

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

СЕМИНАР ВУЗОВ
ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ
И ЭНЕРГЕТИКЕ

Материалы
Всероссийской научной конференции
с международным участием

21–23 октября 2019 года

Санкт-Петербург



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2019

УДК (532/536+620.9)(063)
ББК 31.3
С30

Семинар вузов по теплофизике и энергетике : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, 21–23 октября 2019 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 447 с.

Сборник составлен из расширенных тезисов докладов, включенных в программу Всероссийской научной конференции с международным участием «XI семинар вузов по теплофизике и энергетике». Представленные материалы подготовлены научно-педагогическими работниками, студентами, учеными и специалистами из различных университетов и профильных научно-исследовательских организаций. Они охватывают широкий круг фундаментальных и прикладных проблем в области тепломассообмена и физической гидродинамики, горения натуральных топлив, энергоэффективности и энергосбережения, совершенствования энергетического оборудования ТЭС и АЭС, проблем управления энергетическими объектами. Рассматриваются также вопросы развития и приложения методов математического моделирования для решения разнообразных задач теплофизики и энергетике, в том числе с применением современных технологий вычислительной гидродинамики.

Ответственный за выпуск – доктор физико-математических наук
Е. М. Смирнов.

ISBN 978-5-7422-6703-4

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2019

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

PETER THE GREAT
SAINT-PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY

THERMOPHYSICS
AND POWER ENGINEERING
IN ACADEMIC CENTERS,
TPEAC-2019

Proceedings
of the All-Russian Scientific Conference
with International Participation

October 21–23, 2019

Saint-Petersburg



POLYTECH-PRESS

Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic
University

Saint-Petersburg

2019

Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers, TPEAC-2019 : proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation, October 21–23, 2019, Saint-Petersburg. – SPb. : POLYTECH-PRESS, 2019. – 447 p.

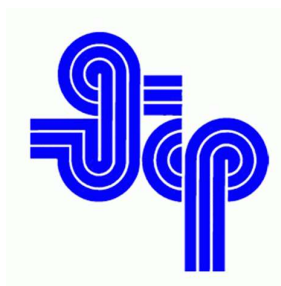
The conference proceedings volume is a collection of extended abstracts of the contributions included in the program of the All-Russian Scientific Conference with International Participation “Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers”, TPEAC-2019. The contributions have been prepared by professors, researchers, students and engineers from various universities and profile research institutions. They cover a wide range of fundamental and applied problems in the areas of heat and mass transfer, physical fluid dynamics, combustion of natural fuels, energy-efficiency and energy-saving, improvement of power equipment of thermal and nuclear power plants, control of power objects. A considerable part of the collection covers actual questions of development and application of mathematical modeling methods for solving various problems of thermophysics and power engineering, including applications based on the up-to-date computational fluid dynamics technologies.

Edited by *E. M. Smirnov*.

***Организаторы XI Семинара ВУЗов
по теплофизике и энергетике:***

Санкт-Петербургский
политехнический
университет Петра Великого

Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения РАН



Научный и организационный комитеты

***XI Семинара ВУЗов
по теплофизике и энергетике***

благодарят

***Российский Фонд Фундаментальных Исследований
за финансовую поддержку (грант № 19-08-20125)***

Сопредседатели организационного комитета:

Рудской А.И., академик РАН, ректор СПбПУ

Алексеев С.В., академик РАН, научный руководитель ИТ СО РАН

Заместитель председателя оргкомитета:

Смирнов Е.М., д.ф.-м.н., Высшая школа прикладной математики и
вычислительной физики, СПбПУ

Члены организационного комитета:

Галаев С.А.

Егоров М.Ю.

Забелин Н.А.

Засимова М.А.

Иванов Н.Г.

Калюттик А.А.

Китанина Е.Э.

Кожухов Ю.В.

Куйбин П.А.

Левченя А.М.

Рис В.В.

Смирнова А.Л.

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

Тел.: +7(812) 297 24 19, Факс: +7(812) 552 66 21

E-mail: tpeac@spbstu.ru

Председатель научного комитета:
Маркович Д.М., член-корр. РАН, ИТ СО РАН

Заместители председателя:
Сергеев В.В., член-корр. РАН, СПбПУ,
Куйбин П.А., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН, Смирнов Е.М., д.ф.-м.н., СПбПУ

Члены научного комитета:

Бараненко А.В., <i>Санкт-Петербург</i>	Богатова Т.Ф., <i>Екатеринбург</i>
Богомоллов А.Р., <i>Кемерово</i>	Борейшо А.С., <i>Санкт-Петербург</i>
Боровиков Ю.С., <i>Новгород</i>	Виноградова О.И., <i>Москва</i>
Гортышев Ю.Ф., <i>Казань</i>	Дедов А.В., <i>Москва</i>
Дектерев А.А., <i>Красноярск</i>	Дмитриев А.С., <i>Москва</i>
Елистратов В.В., <i>Санкт-Петербург</i>	Елистратов С.Л., <i>Новосибирск</i>
Заворин А.С., <i>Томск</i>	Исаев С.А., <i>Санкт-Петербург</i>
Клименко В.В., <i>Москва</i>	Коротеев А.А., <i>Москва</i>
Кузма-Кичта Ю.А., <i>Москва</i>	Кузнецов В.В., <i>Новосибирск</i>
Кузнецов Г.В., <i>Томск</i>	Куперштох А.Л., <i>Новосибирск</i>
Мильман О.О., <i>Калуга</i>	Митрофанова О.В., <i>Москва</i>
Митяков А.В., <i>Санкт-Петербург</i>	Павленко А.Н., <i>Новосибирск</i>
Петреня Ю.К., <i>Санкт-Петербург</i>	Пиралишвили Ш.А., <i>Рыбинск</i>
Покусаев Б.Г., <i>Москва</i>	Попов И.А., <i>Казань</i>
Рыжков А.Ф., <i>Екатеринбург</i>	Сапожников С.З., <i>Санкт-Петербург</i>
Сон Э.Е., <i>Москва</i>	Стенников В.А., <i>Иркутск</i>
Терехов В.И., <i>Новосибирск</i>	Тринченко А.А., <i>Санкт-Петербург</i>
Тугов А.Н., <i>Москва</i>	Устименко А.Б., <i>Казахстан</i>
Федоров М.П., <i>Санкт-Петербург</i>	Федорович Е.Д., <i>Санкт-Петербург</i>
Хомич В.Ю., <i>Санкт-Петербург</i>	Чичирова Н.Д., <i>Казань</i>
Штым К.А., <i>Владивосток</i>	Щинников П.А., <i>Новосибирск</i>

Ученый секретарь:
Иванов Н.Г., к.ф.-м.н., СПбПУ

**ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВА КРЕМНИЯ В ТИГЛЕ МЕТОДА
ЧОХРАЛЬСКОГО: ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Задачи изучения турбулентных режимов термоконвективных течений, развивающихся в ограниченных областях, постоянно вызывают интерес исследователей. Сегодня, в условиях постоянно растущих вычислительных возможностей, на первый план выходят расчетные исследования, проводимые на основе высокоточных вихреразрешающих подходов, и все шире для решения задач в сложной геометрии используется метод, известный как Implicit LES.

Востребованным направлением исследований является численное моделирование конвективных течений и процессов теплообмена в расплавах полупроводников, находящихся в установках выращивания кристаллов по методу Чохральского (см., например, [1]). Для задач этого рода характерна множественность факторов физической и химической природы, воздействующих на конвекцию и теплообмен в расплаве, и, как следствие, на качество получаемых кристаллов. В условиях существующих неопределенностей в задании свойств жидкого кремния и окружающих тигель твердых материалов весьма целесообразным представляется выполнение расчетов, нацеленных на определение степени влияния отдельных факторов на результаты предсказательных расчетов. В настоящей работе в качестве варьируемого параметра задачи выступает коэффициент теплового излучения с поверхности расплава кремния.

Численное моделирование турбулентного свободноконвективного течения и теплообмена в расплаве кремния ($Pr = 0.015$), находящемся во вращающемся тигле, проводилось для условий промышленной установки выращивания кристаллов EKZ 1300 [2]. Значения режимных параметров отвечали реальным условиям роста: число Релея $Ra = 8.2 \cdot 10^6$, число Россби $Ro = 1.9$ (соответствует угловой скорости вращения тигля $\Omega_c = 5$ об/мин), отношение скоростей вращения кристалла и тигля $\Omega_s/\Omega_c = -4$. Расчеты выполнялись в сопряженной постановке на сетке размерностью 1.8 млн. ячеек. Значение коэффициента излучения α , с учетом имеющихся в литературе данных, задавалось равным 0.25 и 0.3. Расчеты на основе полных уравнений Навье-Стокса, записанных в приближении Буссинеска, выполнялись по методу Implicit LES с использованием конечно-объемного неструктурированного кода внутреннего пользования SINF/Flag-S.

^(*) С.И. Смирнов, sergeysmirnov92@mail.ru

По результатам проведенных расчетов установлено весьма сильное влияние указанного варьируемого параметра на тепловое состояние расплава (рис. 1). Лучшая степень согласия с экспериментальными данными [2] по полю температуры получена для варианта с $\alpha = 0.3$ (рис. 2).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-01543. Расчеты проводились на вычислительном кластере СКЦ СПбПУ.

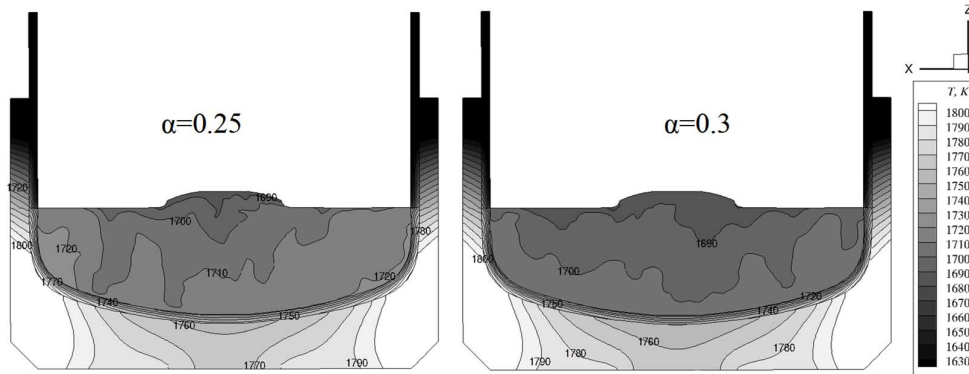


Рис. 1. Мгновенные поля температуры в вертикальном сечении тигля (для разных α)

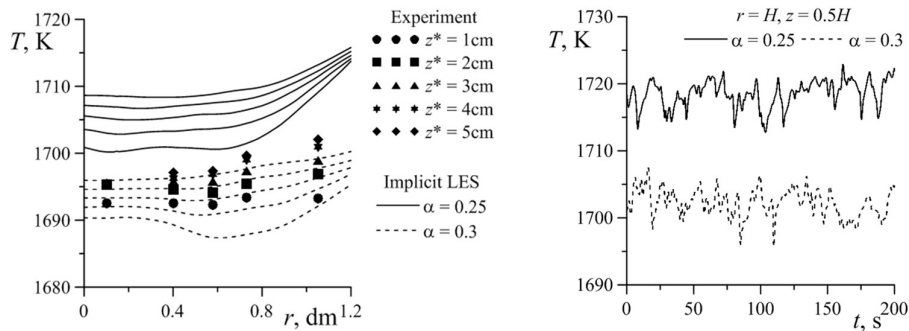


Рис. 2. Распределение осредненной во времени температуры в расплаве и колебания температуры во времени в точке мониторинга (для разных α)

ЛИТЕРАТУРА

1. Evstratov I.Yu., Kalaev V.V., Zhmakin A.I., etc. Modeling analysis of unsteady three-dimensional turbulent melt flow during Czochralski growth of Si crystals // J. Cryst. Growth, 2001. Vol. 230. P. 22.
2. Dornberger E., Tomzig E., Seidl A., etc. Thermal simulation of the Czochralski silicon growth process by three different models and comparison with experimental results // J. Cryst. Growth, 1997. Vol. 180. P. 461.

A.G. Abramov, E.M. Smirnov, S.I. Smirnov
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

EDDY-RESOLVING NUMERICAL SIMULATION OF SILICON MELT CONVECTION IN A CZOCHRALSKI CRUCIBLE: EFFECT OF RADIATION FROM THE FREE SURFACE

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ВТОРОГО РОДА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗДЕЛЬНОЙ ПО ЖИДКОЙ ПЛЕНКЕ И
ПАРОКАПЕЛЬНОМУ ПОТОКУ ФОРМУЛИРОВКЕ**

На сегодняшний день актуальной моделью течения двухфазного пароводяного потока в каналах является трехжидкостная модель с общим давлением в фазах [1–3], рассматривающая пароводяной поток как поток трех взаимопроникающих «жидкостей», имеющих свои скорости, температуры и истинные объемные доли. Такая модель позволяет решить проблему численной неустойчивости, которая проявляется в двухжидкостной модели для случая дисперсно-кольцевого режима при кризисе теплообмена второго рода. Связано это с тем, что в этом случае скорость жидкости в пленке скачком обретает скорость капель в дисперсном режиме [4].

Маршевый алгоритм интегрирования системы уравнений в двух или трехжидкостном приближении предполагает одновременное определение значений давления и объемных долей компонентов двухфазной среды. При стремлении одной из объемных долей к нулевому значению матрица перехода теряет обусловленность. Можно указать на два варианта решения этой проблемы. Первый вариант связан с тем, что при достижении пороговых значений (значений отсечки) величина объемной доли для пленки в дальнейшем не уменьшается. Это позволяет сохранить структуру матрицы, однако балансовые соотношения для пленки заменяются упрощенными соотношениями.

Другой вариант основан на том, что при кризисе теплообмена второго рода происходит переключение с трехжидкостной модели на двухжидкостную модель. Для этого трехжидкостная система разбивается на две подсистемы – дисперсное парокапельное ядро (двухжидкостная модель) и группу уравнений, описывающих состояние пленки. Для подсистемы, описывающей состояние парокапельного ядра, точка высыхания пленки не является математической особенностью. В свою очередь решение подсистемы для определения состояния пленки регулируется оценкой величины массы жидкости в пленке, достаточной для ее испарения.

Рассмотрим детали второго алгоритма. Парокапельное ядро будет описываться набором из 6 дифференциальных балансовых уравнений, которые, позволяют определить значение давления и другие характеристики дисперсионного парокапельного потока:

^(*) Е.Э. Авдеев, avdeev-evgeni@yandex.ru

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_p\rho_p W_p) = R_p^m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_p\rho_p W_p^2) + \bar{\varphi}_p \bar{A} \frac{\partial P}{\partial z} = R_p^i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_p\rho_p W_p H_p) = R_p^e \quad (3)$$

$$\varphi_v + \varphi_d = 1 - \varphi_f \quad (4)$$

Система обозначений соответствует [4]. Далее, используя градиент давления, решаются уравнения для описания состояния пленки:

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_f\rho_f W_f) = R_f^m \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_f\rho_f W_f^2) = -\bar{\varphi}_f \bar{A} \frac{\partial P}{\partial z} + R_f^i \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_f\rho_f W_f H_f) = R_f^e \quad (7)$$

Условие существования пленки связано с балансом тепла для жидкости, описывающей состояние пленки, и балансом массы в пленке. Это реализовано в рамках логики, обеспечивающей редукцию системы к шести уравнениям в момент высыхания пленки, и восстановления полной системы из девяти уравнений в момент ее нового образования. Уточнение положения точки высыхания определялось при помощи процедуры дробления шага.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Deng, M. Fernandino, C. A. Doraio, Modeling of annular-mist flow during mixtures boiling. *Applied Thermal Engineering*, 91 (2015) 463–470.
2. W. Han, Y. Li, J. Shi, B. Sun, G. Zhang, L. Yang, Numerical simulation of dryout and post-dryout heat transfer in a straight-pipe once-through steam generator. *Applied Thermal Engineering*, 105 (2016) 132–141.
3. Авдеев Е.Э., Плетнев А.А., Булович С.В. Трехжидкостная формулировка и численный метод решения стационарной задачи теплогидравлики двухфазного потока в дисперсно-кольцевом режиме течения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. № 11 (3). С. 122–132.
4. Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А. Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 22-28

E.E. Avdeev, S.V. Bulovich
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

SIMULATION OF THE CRISIS OF HEAT EXCHANGE OF THE SECOND KIND USING SEPARATE FORMULATION ON THE LIQUID FILM AND DISPERSE TWO-PHASE FLOW

С.С. Азиханов^{1, (*)}, А.Р. Богомолов^{1, 2}, Е.Н. Дронов¹
¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ НА ГАЗОДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ

Высокие цены на жидкое топливо и повышение требований к экологической безопасности создало благоприятные условия для использования в качестве топлива природного газа. На сегодняшний момент стоимость природного газа почти в два раза ниже стоимости дизельного топлива. Как моторное топливо природный газ превосходит нефтяное топливо: в транспортных двигателях обеспечиваются высокие технико-экономические показатели, поскольку газ имеет хорошие антидетонационные свойства, благоприятные условия смесеобразования и широкие пределы воспламенения в смеси с воздухом [1]. Замещение 40% природным газом дизельного топлива по энергетическому заряду на карьерном самосвале БелАЗ 75131 с двигателем КТА 50-С мощностью 1200 кВт позволит сэкономить на топливе в год почти 6 млн. рублей. Экономическая выгода при существующих ценах на топливо очевидна. Использование сжиженного природного газа (СПГ) позволяет сохранить пробег автомобиля на одной заправке по сравнению с дизельным топливом, тогда как при использовании компримированного природного газа для этого требуется установка дополнительных баллонов со сжатым газом, вследствие чего увеличивается вес и габариты газобаллонного оборудования. Кроме экономической выгоды присутствует и экологическая - снижение токсичных выбросов в атмосферу, при этом мощность двигателя практически не меняется.

Предметом исследования являются закономерности работы двигателя CUMMINS КТА 50-С при частичном замещении дизельного топлива СПГ. Цель данной работы – анализ работы двигателя БелАЗ-75137 по газодизельному циклу и выявление причины нештатных пульсаций природного газа, подаваемого в двигатель внутреннего сгорания через форсунки.

В исследуемых БелАЗах сжиженный природный газ из криогенных танков, установленных на палубе, поступает в испаритель, где происходит его кипение с необходимым перегревом. После испарителя, редукционного клапана и форсунок газ подается в воздухозаборные каналы, в которых смешивается с воздухом, образуя газо-воздушную смесь.

В ходе исследований проводились следующие измерения:

(*) С.С. Азиханов, azihanov@rambler.ru

- проведен анализ состава сжиженного природного газа для определения теплоты сгорания топлива; определен расход природного газа подаваемого в цилиндры двигателя внутреннего сгорания; определен расход и температура охлаждающей жидкости на входе в испаритель и выходе из него для составления теплового баланса; определен расход воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя внутреннего сгорания для определения коэффициента избытка воздуха.

Замеры проводились при различных режимах работы БелАЗа (пустой, груженный, движение в гору и под гору).

Авторами был произведен расчет системы подачи природного газа при замещении дизельного топлива на 30%. Был определен диаметр трубопровода после форсунок, обеспечивающий рекомендуемую скорость движения газа по трубопроводу. Для контроля количества подаваемого природного газа предложен измерительный комплекс подачи газа. На тестовых испытаниях наблюдалась равномерная подача газа в оба канала. Перебоев и детонаций в работе двигателя не наблюдалось. Кроме того, было зафиксировано уменьшение перепада давления между правой и левой турбинами при работе по газодизельному циклу в сравнении с дизельным.

Основными компонентами СПГ являются метан и этан, сумма которых составляет не менее 96%. Теплота сгорания 35,5 МДж/нм³.

Разница температур охлаждающей жидкости между входом и выходом испарителя составляла 1,0-10°C, расход изменялся в пределах 74-133 л/мин. Количество переданной теплоты от теплоносителя к СПГ позволяло достигать температуры природного газа не ниже 40°C.

Замещение по энергетическому заряду определяли по температуре выпускных газов. В газодизельном режиме температура выпускного газа была выше не более 20°C по сравнению с работой самосвала исключительно на дизельном топливе. Это свидетельствует о том, что на замещение 1 литра дизельного топлива производилась подача природного газа в количестве 1 нм³.

Коэффициент избытка воздуха при различных нагрузках варьировался в пределах 0,6-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский. – М.: Недра, 1986. – 255 с.

S.S. Azikhanov¹, A.R. Bogomolov^{1,2}, E.N. Dronov¹
¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

RESEARCH OF EFFICIENCY OF WORK OF CAREER DUMP BELAZ ON GAS DIESEL FUEL

КРОСС-ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ИНЖЕКЦИИ ГАЗА В ЖИДКОСТИ С РАЗНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Целью настоящей работы является кросс верификация кода OpenFoam и теплогидравлического кода HYDRA/IBRAE/LM на задачах по инъекции газа (воздуха) в замкнутую трубную область, заполненную водой и жидким свинцом.

Воздух под давлением $180 \cdot 10^5$ Па из трубы длиной 100 мм и диаметром 100 мм через трубный канал диаметром 20 мм и длиной 100 мм инжестировался в вертикальную, замкнутую трубную область диаметром 200 мм и высотой 500 мм с давлением $20 \cdot 10^5$ Па. Уровень жидкости составлял 400 мм. Над поверхностью жидкости находился газ при температуре жидкости. Температура газа составляла 650 К, температура воды 300 К, температура свинца 650 К. Теплообмен между фазами в расчёте не учитывался. Подробно геометрия и расчётная схема эксперимента описаны в работах [1,2].

На рисунке 1 представлен расчет объёмного газосодержания в двумерной осесимметричной постановке в коде OpenFoam при инъекции газа (воздуха) в воду (а) и в жидкий свинец (б) для момента времени 20 мс. При инъекции газа в воду реализуется струйное течение, при инъекции в свинец газ локализуется в нижней части расчётной области.

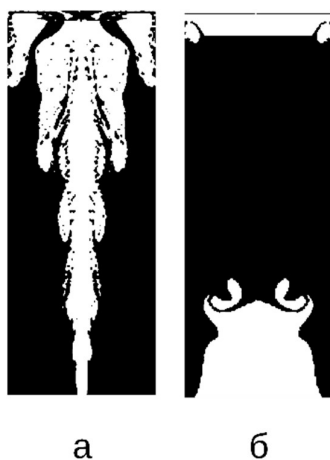


Рис. 1. Расчет объёмного газосодержания в осесимметричном приближении в OpenFoam при инъекции газа (воздуха) в воду (а) и жидкий свинец (б) в момент времени 20 мс, черный цвет — жидкость, белый цвет — газ.

(*) М.В. Алексеев, alekseev@itp.nsc.ru

Существенно различающееся распределение фаз в объеме для воды и свинца (рис. 1) влияет как на характер пульсаций давления, так и на их диссипацию. На рисунке 2 представлена зависимость давления от времени на расстоянии 50 мм от инжектора, рассчитанная кодами HYDRA/IBRAE/LM (1) и OpenFoam (2). При расчете инъекции газа в воду кодом HYDRA/IBRAE/LM получены пульсации давления более высокой амплитуды, чем при расчёте кодом OpenFoam. При расчёте инъекции в жидкий свинец кодом HYDRA/IBRAE/LM получено более интенсивное затухание пульсаций давления, чем в расчете кодом OpenFoam.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, гос. Задание № III.22.7.3.

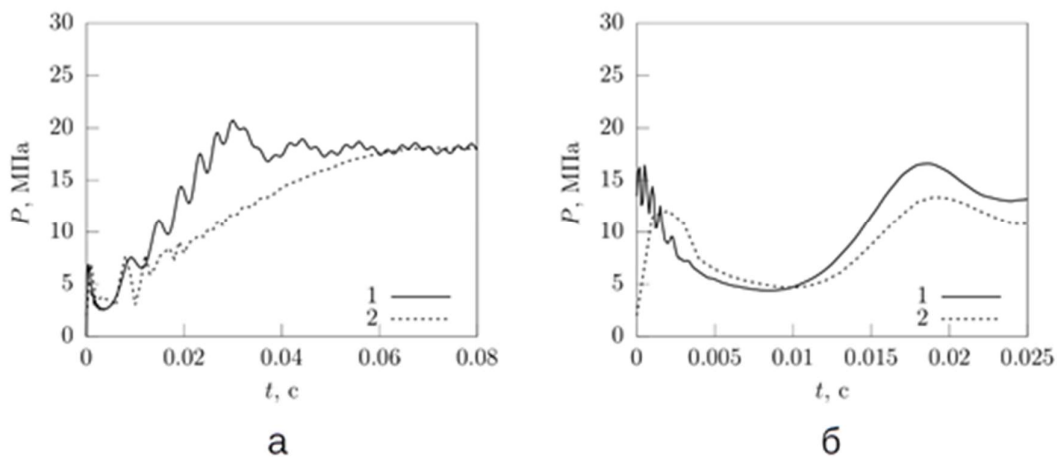


Рис. 2. Изменение давления от времени при инъекции газа (воздуха) в воду (а) и жидкий свинец (б) на расстоянии 50 мм от нижнего торца. 1 — расчет HYDRA/IBRAE/LM, 2 — расчет OpenFoam.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lezhnin S.I., Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Pribaturin N.A. Simulating gas (vapor) outflow into a liquid // Journal of Physics (IOP): Conference Series. 2018. Vol. 1105, Paper 012081, 5.p.
2. Lezhnin S.I., Alekseev M.V., Vozhakov I.S. Modeling the dynamics of gas (steam) outow into a high-density liquid taking into account interfacial heat exchange // Journal of Physics (IOP): Conference Series. 2018. Vol. 1128, Paper 012037, 4.p.

M.V. Alekseev¹, I. S. Vozhakov¹, I.G. Kudashov²,
S.I. Lezhnin^{1,2}, N.A. Pribaturin^{1,2}

¹Institute of Thermophysics. S. S. Kutateladze SB RAS,

²Nuclear Safety Institute RAS

CROSS-VERIFICATION OF THERMAL-HYDRAULIC CODES FOR GAS INJECTION INTO LIQUIDS OF DIFFERENT DENSITIES

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЖЕКЦИИ ГАЗА ИЗ ДЛИННОЙ ТРУБКИ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В КАНАЛ, ЗАПОЛНЕННЫЙ ЖИДКОСТЬЮ

Создание экспериментальных тестов (бенчмарков) для верификации теплогидравлических энергетических кодов накладывает ограничения на методику проведения экспериментов. Очень важна однозначная реализация граничных условий в эксперименте для последующего моделирования теста в кодах. При этом эксперимент должен адекватно отражать теплогидравлические процессы, которые возникают в реальных атомных энергетических установках. Ранее авторами были проведены экспериментальные исследования и численное моделирование истечения газа в вертикальный канал, заполненную жидкостью [1, 2]. Исследование отражает ситуацию разрыва канала с пароводяным теплоносителем в парогенераторах атомных энергетических установок. В реальной аварийной ситуации в парогенераторе истечение происходит из длинной тонкой трубки. При этом диаметр отверстия, из которого происходит истечение, может варьироваться от диаметра трубки (гильотинный разрыв) до предельно малой доли раскрытия (малая течь).

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное моделирование в среде OpenFoam процесса инжекции газа из длинной трубки в заполненный жидкостью канал через диафрагму с регулируемым диаметром отверстия.

В настоящей работе инжекция газа осуществлялась из трубки длиной 1 м и внутренним диаметром 6 мм. Объем данной трубки заполнялся воздухом с избыточным давлением 100 – 500 кПа. В качестве клапана между трубкой и рабочим участком использовалась «пережимная» резиновая трубка. Герметизация осуществлялась с помощью зажима. Ослабление зажима позволяло быстро открывать канал. Скоростная видео-регистрация показала выявлено, что время открытия составляет 5-10 мс. Во второй серии экспериментов между трубкой и рабочим участком была установлена диафрагма с регулируемым диаметром отверстия.

На рисунке 1 представлена экспериментальная эволюция межфазной поверхности при инжекции воздуха ($P_0 = 100$ кПа) в воду в разные моменты времени при отсутствии (верхняя последовательность кадров) и наличии диафрагмы (нижняя). Как и ожидалось, при инжекции в отсутствие диафрагмы

(*) М.В. Алексеев, alekseev@itp.nsc.ru

происходит существенная диспергация газа на пузырьки. При наличии диафрагмы происходит рост газовой фазы в виде одного газового пузыря.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, гос. Задание № III.22.7.3.

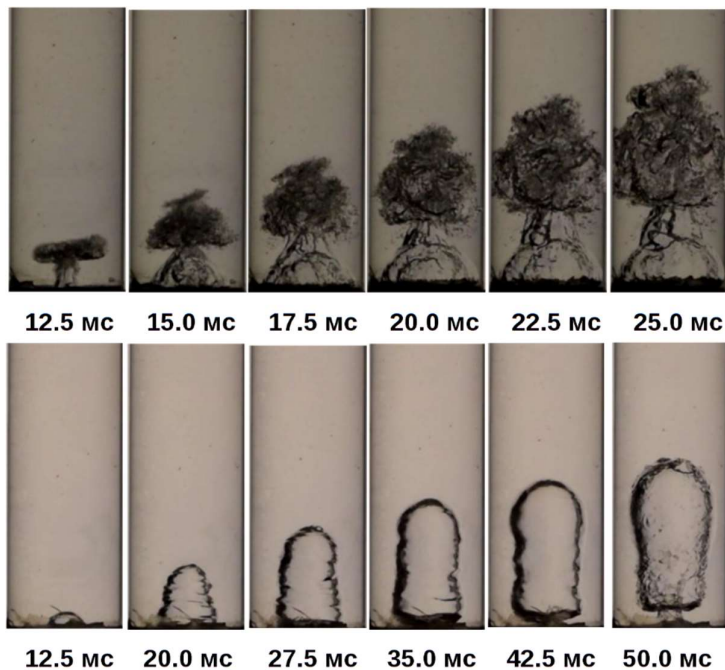


Рис. 1. Развитие межфазной поверхности при инъекции газа (воздуха) в воду в разные моменты времени; верх – диафрагма отсутствует, низ – диафрагма с отверстием 2 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lobanov P.D., Svetonosov A.I., Kalpana Mohan V., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Numerical simulation of pulsed gas-to-liquid injection modes using open source CFD software package OpenFoam // Journal of Physics (IOP): Conference Series. 2018. Vol. 1105, Paper 012085, 5.p. doi :10.1088/1742-6596/1105/1/012085
2. Alekseev M.V., Lobanov P.D., Svetonosov A.I., Kalpana Mohan V., Lezhnin S.I. and Pribaturin N.A. Experimental and numerical investigation of the modes pulsed gas injection into various liquids // Journal of Physics (IOP): Conference Series. 2018. Vol. 1128 Paper 012043, 5.p. doi : 10.1088/1742-6596/1128/1/012043

M.V. Alekseev¹, P.D. Lobanov¹, A.I. Svetonosov^{1,2},
S.I. Lezhnin^{1,2}, N.A. Pribaturin¹
¹Institute of Thermophysics. S. S. Kutateladze SB RAS,
²Novosibirsk state University

MODELING OF GAS INJECTION FROM A LONG TUBE THROUGH A SMALL HOLE IN A CHANNEL FILLED WITH LIQUID

Б.Б. Алчагиров^(*), О.Х. Кясова, А.Л. Латипов,
Ф.Ф. Дышекова, А.Х. Хибиев, В.Н. Лесев
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОГО ГАЛЛИЯ В АТМОСФЕРАХ АЗОТА И ВОЗДУХА

Исследования теплофизических свойств жидких металлов, в частности поверхностного натяжения (ПН), на границах с газовой фазой имеют важное научное и прикладное значения для создания новых высокоэффективных теплоносителей в атомной энергетике, разработки технологических процессов формирования изделий методами жидкофазного спекания и т.п. В настоящей работе решается вопрос о степени влияния атмосферного воздуха и газообразного азота на ПН жидкого галлия, который в перспективе предполагается использовать в качестве теплоносителя ядерно-энергетических комплексов с повышенной безопасностью [1].

В литературе имеется мало исследований, посвященных изучению ПН жидкого галлия в различных газовых атмосферах [2], большинство из которых получены малонадежными методами и на устаревшем оборудовании, результаты которых плохо согласуются между собой. Наиболее систематические исследования ПН жидкого галлия и других легкоплавких металлов в газовых атмосферах проводились в Кабардино-Балкарском госуниверситете, в которых измерения ПН осуществлялись в вакууме и газовой среде при давлении около 720 мм. рт. ст. методом «большой» капли при 333 К.

В данной работе использованы цельно-паяная измерительная ячейка и автоматизированная экспериментальная установка, позволяющие фиксировать быстрые изменения ПН галлия в условиях протекания адсорбционных процессов [3]. Измерения ПН осуществлялись в непрерывном режиме на одной и той же поверхности капли Ga последовательно, сначала в условиях статического вакуума, а затем - в атмосфере высокочистого азота или воздуха. Погрешность определения ПН - около 2%.

На рис. 1 представлены результаты наших измерений ПН галлия в зависимости от времени экспонирования в атмосфере азота, на котором видно, что после вскрытия ампулы с газообразным азотом ПН галлия не изменилось в сравнении с его величиной в вакууме в течение одного часа и, в среднем, составило 730 мН/м. В атмосфере воздуха ПН галлия понизилось до 400 мН/м.

Отметим, что в момент вскрытия ампулы с газом произошла небольшая встряска прибора, приведшая к еле заметному механическому колебанию поверхности исследуемой жидкой капли, который четко отразился в виде

^(*) Б.Б. Алчагиров, alchg@kbsu.ru, boris@alchagirov.ru

«всплеска» величины ПН Ga (рис. 1) амплитуда которой составила около 170 мН/м, что значительно превышает погрешность наших измерений ПН и свидетельствует о высокой чувствительности экспериментальной установки к любым изменениям поверхностного натяжения.

Таким образом, в пределах погрешности измерений (2%) высокочистый азот не влияет на поверхностное натяжение галлия, но в атмосфере воздуха ПН галлия понижается до 400 мН/м.

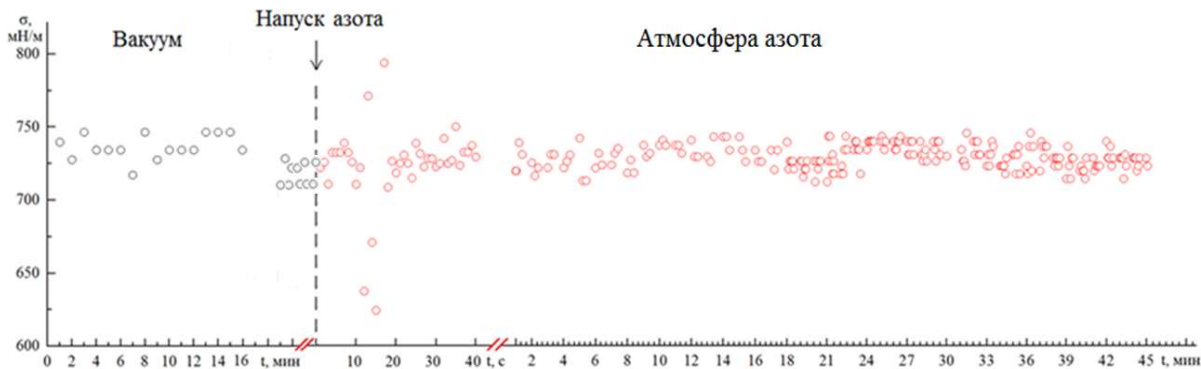


Рис. 1. Поверхностное натяжение галлия в вакууме и атмосфере азота

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоренко В.Я., Рощупкин В.В., Покрасин М.А., Прохоренко С.В., Котов В.В. Жидкий галлий: перспективы использования в качестве теплоносителя // ТВТ. 2000. Т. 38. № 6. С. 991–1005.
2. Унежев Б.Х., Задумкин С.Н., Карашаев А.А. Влияние газовой среды на поверхностное натяжение жидких металлов. // В. кн.: Электрохимия и расплавы. М.: Наука. 1974. С. 111 – 118.
3. Алчагиров Б.Б., Дышекова Ф.Ф., Коков З.А. Автоматизированная экспериментальная установка для определения быстрых изменений поверхностного натяжения жидкометаллических расплавов и краевых углов смачивания ими поверхностей твердых тел // Приборы. 2017. № 2 (200). С.18–28.

V.B. Alchagirov, O.Kh. Kyasova, A.L. Latipov,
F.F. Dyshekova, A.Kh. Khibiev, V.N. Lesev
Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

THE SURFACE TENSION OF LIQUID GALLIUM IN NITROGEN AND AIR ATMOSPHERES

УДК 531.756.3; 531.756.4; 532.61.08; 532.612

Б.Б. Алчагиров^{1, (*)}, Х.Б. Хоконов¹, Р.Х. Дадашев²,
Ф.Ф. Дышекова¹, Т.М. Таова¹, О.Х. Кясова¹

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
²Чеченский государственный университет

ВНЕДРЕНИЕ В УЧЕБНУЮ ПРАКТИКУ НОВЫХ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ПАТЕНТОВ: ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Важнейшим этапом и составной частью научных исследований в высших учебных заведениях является совершенствование существующих и создание новых перспективных методов и приборов для их реализации. В работе авторы делятся опытом внедрения в учебную практику своих изобретений и патентов, содержащих новые оригинальные методы, приборы и устройства, успешно используемые студентами физических специальностей Кабардино-Балкарского и Чеченского государственных университетов для изучения теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей - плотности и поверхностного натяжения.

Плотность. Понятие плотности вещества известно учащимся со школьной скамьи и, в связи с кажущейся его простотой, у студентов вузов часто наблюдается несколько пренебрежительное отношение к плотности и заблуждение о якобы ее малой значимости для современной науки и техники. В связи с этим, предлагая студентам выполнение цикла работ по определению плотности, авторы настоятельно рекомендуют еще раз обратить внимание на важность проблемы изучения плотности. Плотность вещества относится к фундаментальным физическим величинам, характеризующим одно из важнейших свойств вещества, и имеет важное научное и прикладное значение. Плотность является интегральной структурно-чувствительной характеристикой металлов и сплавов. Ее изменения при плавлении и затвердевании металлов и полиморфных превращениях в них, связаны с изменениями в структуре ближнего порядка, координационного числа и межатомных расстояний, а также характера химической связи.

В работе описываются усовершенствованные авторами ареометрический (с капиллярным отводом), прецизионный одно- и двух-капиллярный пикнометрический и другие методы и приборы для определения плотности жидкометаллических расплавов, а также особенности каждого из них [1-4].

Поверхностное натяжение. При выполнении цикла работ по изучению и практическому освоению основных методов измерения ПН весьма важно, чтобы

(*) Б.Б. Алчагиров, alchg@kbsu.ru, boris@alchagirov.ru

студенты с самого начала помнили о чрезвычайно высокой чувствительности ПН жидкометаллических расплавов к условиям его измерений: - к степени вакуумирования рабочей камеры и/или измерительной ячейки; - к наличию малых примесей в исследуемых образцах и защитных газовых средах, в которых проводятся измерения ПН; - к перепадам температуры в рабочих камерах и измерительных ячейках; - к полноте гомогенизации исследуемых сплавов, особенно склонных к полиморфным превращениям и образованию в них кластеров и т.п.; - к степени обеспечения идентичных условий измерения ПН каждого из сплавов при изучении концентрационных зависимостей ПН и т.д. В связи с этим студентам настоятельно рекомендуется изучить ряд основополагающих статей из рекомендуемого преподавателем списка научно-методической литературы, посвященной теоретическим основам и особенностям отдельных методов определения ПН, а также возможным источникам ошибок, обычно допускаемых при измерениях ПН металлических расплавов с последующим обязательным обсуждением на семинарах и коллоквиумах, а главное - при допуске каждого из студентов к выполнению работы на рабочем месте, в лаборатории.

В работе рассмотрены основные экспериментальные методы и их классификация, приборы и устройства для определения ПН жидкостей и их особенности, а также возможные источники ошибок: метод большой капли; метод максимального давления в капле или газовом пузырьке; метод отрыва полого цилиндра; метод инерционной перегрузки; измерение ПН жидких металлов методом левитации во взвешенном состоянии и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алчагиров Б.Б., Таова Т.М., Хоконов Х.Б. Прибор для определения плотности жидких металлов и сплавов. Патент на изобретение № 2304275. (Выдан 10 августа 2007 г. Бюллетень № 22.).
2. Алчагиров Б.Б., Дадашев Р.Х. Метод большой капли для определения плотности и поверхностного натяжения металлов и сплавов. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет (КБГУ), 2000. – 94 с.
3. Озниева Д.Т. А.С. № 700824 (СССР). Бюллетень изобретений, 1979, № 44.
4. Хоконов Х.Б., Коков М.Б. Способ определения поверхностного натяжения жидкостей. А. С. 989386 (СССР). 1983.

В.В. Alchagirov¹, Kh.B.Khokonov¹, R.Kh. Dadashev²,
F.F. Dysheкова¹, Т.М. Таова¹, О.Кх. Кыасова¹

¹Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M.Berbekov,

²Chechen State University

INTEGRATION TO EDUCATIONAL PRACTICE OF NEW INVENTIONS AND PATENTS: DEVICES AND METHODS FOR MEASURING DENSITY AND SURFACE TENSION OF LIQUID METALLIC MELTS

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО НАСОСА ПРИ АТМОСФЕРНОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКЕ

Многочисленные научные исследования, проведенные в пищевой, химической и фармацевтической отраслях, показали неоспоримые преимущества сублимационного способа обезвоживания замороженных продуктов путем возгонки льда. В истории развития вакуумных сублимационных сушильных установок известны успешные примеры использования тепловых насосов с целью совершенствования установки, повышения качества выпускаемой продукции и уменьшения как капитальных, так и эксплуатационных затрат. Принципиальная схема такой установки приведена на рис.1 [1],[2].

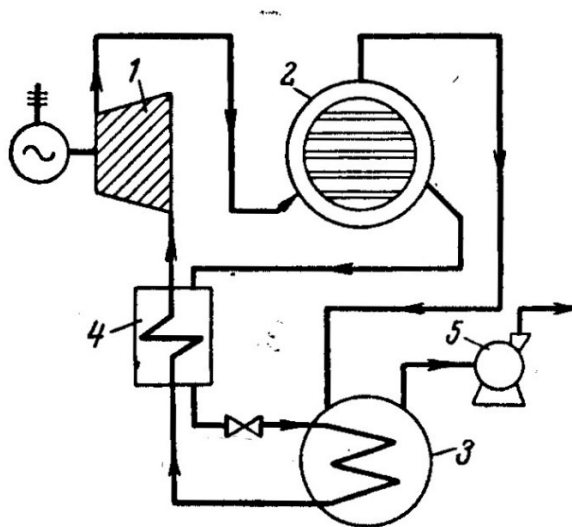


Рис.1 Принципиальная схема применения теплового насоса в сублимационной сушилке. 1-компрессор с электроприводом; 2-сублиматор (конденсатор хладагента); 3- конденсатор (испаритель хладагента); 4-промежуточный теплообменник; 5-вакуум-насос.

Основными недостатками вакуумного способа сублимационного обезвоживания считаются: высокая энергоемкость и материалоемкость установок, низкая интенсивность процесса, невозможность непрерывного контроля качества продукта, невозможность получения частиц с заданными структурой и свойствами. Для совершенствования технологии сублимационной сушки была проведена серия экспериментов по сушке протеина в лабораторной

^(*) А.Р. Аляутдинов, aidar1292@gmail.com

атмосферной сушилке псевдооживленного слоя с тепловым насосом [3]. Авторы экспериментального исследования показали, что применение двухстадийной сушки с использованием теплового насоса позволяет достигать более низкого значения остаточной влажности объектов сушки за меньший период времени.

Анализ результатов научных исследований различных авторов по использованию тепловых насосов в сублимационных сушильных установках позволил разработать схемное решение для сублимационного обезвоживания неподвижного слоя при атмосферном давлении. Предложенное техническое решение позволяет повысить эффективность работы установки и реализовать имеющийся потенциал ресурсосбережения.

Предлагаемая схема установки для сублимационного обезвоживания при атмосферном давлении состоит из: воздухоохладителя, воздухонагревателя, сетчатого противня с продуктом и вентилятор, который используется для перекачки воздуха.

Расчеты энергетических и технологических параметров показали, что для сушки 100 кг условного продукта(творога) необходимо 45000 м³/ч. Для его нагрева с -17 до -10 требуется 106,2 кВт тепловой энергии. Далее в процессе происходит охлаждение, которое требует отвода 114,2 кВт тепловой энергии. Применение теплового насоса в схеме позволит полезно использовать для нагрева воздуха в рассматриваемом процессе количество теплоты, отводимое при охлаждении продукта.

Таким образом, применение теплового насоса в установке по сублимационному обезвоживанию неподвижного слоя продукта при атмосферном давлении позволяет снизить потребление энергии в процессе сушки. Оборудование с такими характеристиками может быть конкурентоспособным по сравнению с более материалоёмкими и дорогими сушильными установками не только на этапе изготовления, но и в процессе их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М.-Л. издательство "Энергия", 1966, 288 с.
2. Романова Е.В., Орлов А.Ю. Возможности использования тепловых насосов в процессе сушки. Вестник ТГТУ. 2008. Том 14. №3.
3. Гузев О.Ю, Алвес-Фильо О. Инновационная технология сушки протеина. Успехи в химии и химической технологии. Том XXI. 2007. №1(69).

A.R. Alyautdinov, A.V. Antipov, G.P. Vlasenko
National research university MPEI

APPLICATION OF THERMAL PUMP IN THE INSTALLATION OF ATMOSPHERIC FREEZE DRYING

NUMERICAL INVESTIGATIONS ON LATENT HEAT STORAGE UNIT USING PHASE CHANGE MATERIAL

Many renewable energy sources are not available at any time in nature so the development of energy storage technologies is very important to conserve the available energy and improve its utilization. Solar energy is one of the sources of renewable energy. Despite the importance of solar energy, it is not available throughout the day or throughout the year. Therefore, it is important to store solar energy and use it in times when it is not available. Solar energy systems require efficient thermal energy storage to store the heat during sunshine hours and using the heat stored during the night. Thermal energy storage by using phase change materials is considered a promising technology [1].

ANSYS Fluent was used to solve the 2D axisymmetric vertical slice of the cylinder model. ANSYS Fluent solves the melting process model using an enthalpy-porosity formulation for laminar flow with Navier-Stokes equations. The viscous dissipation term was ignored. The Boussinesq approximation was used where the fluid density has been assumed constant in all terms of the momentum equation except the body force term. The energy and momentum equations for this case is written as:

The energy equation: $\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$

The momentum equation: $\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 v) + \nabla \cdot (\rho_0 v v) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + (\rho - \rho_0)g + v A_{mush} \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon}$

Where H is the enthalpy, ρ and ρ_0 is the density and the reference density, v is fluid velocity, k is the thermal conductivity, S is the source term, t is the time, P is the pressure, μ is the dynamic viscosity β is the liquid fraction, ε is a small number (0.001) to prevent division by zero, and A_{mush} is the mushy zone constant and set to 10^5 . In this study, the heat transfer mechanism of vertical shell and tube latent heat storage unit were investigated during the charging process using combined conduction convection heat transfer model. The numerical results were validated by comparison with experimental results of M. K. Rathod and J. Banerjee [2].

Results and discussion. Figure 1 shows the contours of the liquid fraction of phase change material (PCM) during the charging process. The paraffin wax was used as the PCM while the water was used as the heat transfer fluid (HTF) at an inlet temperature of 85 °C (358K) and mass flow rate of 0.0833 kg/s. At the starting of heating PCM, the heat transfer takes place by conduction only where the energy is absorbed in the form of sensible heat. After 1 h of heating PCM by HTF, the average liquid fraction was about 28.4%. When the liquid film of molten PCM is formed during phase transition,

* A.E. Amer, eng.ahmed_amer@eng.psu.edu.eg , eng.ahmed_amer@yahoo.com

the heat transfer is taken place by buoyancy-induced natural convection in the melted PCM. The average liquid fraction increases rapidly with time in the initial 4 h of the melting process and it was about 80.3 %. This is due to the fact that the PCM reaches high temperatures and the effect of natural convection is dominated. After that, the rate of increasing the liquid fraction is reduced. This is due to the reduction in the temperature differences between the heat transfer fluid and PCM and then the rate of heat transfer became slowly. The PCM (paraffin wax) took about 8 hours to be completely melted. The phase transition interface moves faster in the radial direction near the top of the cylinder as compared to the bottom. So a conical path of the phase transition can be observed in the PCM during the melting process.

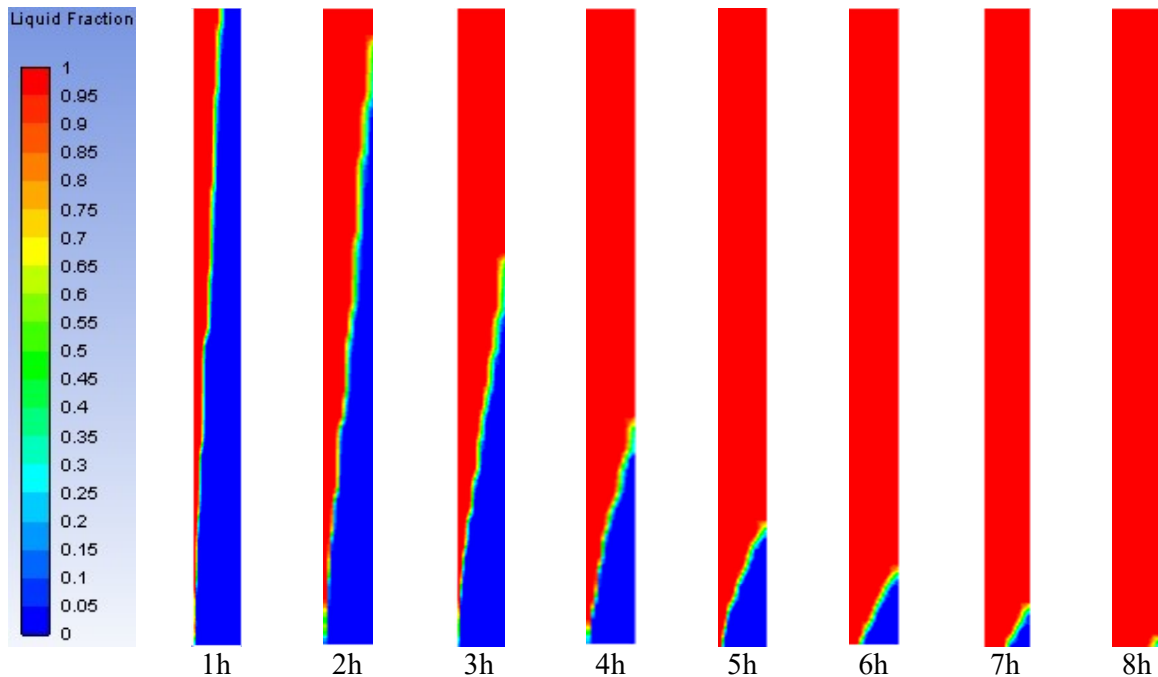


Fig. 1. The contours of the liquid fraction of PCM during the charging process

REFERENCES

1. V.A. Lebedev, A.E. Amer, Thermal Energy Storage by Using Latent Heat Storage Materials // International Journal of Scientific & Engineering Research 9(5), 1442-1447, 2018.
2. M. K. Rathod and J. Banerjee, Experimental investigations on latent heat storage unit using paraffin wax as phase change material, Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion, 2014, 27 (1).

А.Э. Амер^{1,2}, В.А. Лебедев¹

¹Санкт-Петербургский Горный Университет,

²Порт-Саид Университет, Порт-Саид, Египет

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРА
СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА**

Т.А. Андреева, А.Б. Белянкин, А.Е. Беркович,
Н.Ю. Быков^(*), С.В. Козырев, А.Я. Лукин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ТЕПЛОВАЯ АБЛЯЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Лечение раковых заболеваний является приоритетной задачей современной медицины. В последнее десятилетие наряду с традиционными хирургическими методами удаления опухолей все большее распространение находят высокотехнологичные методы лечения, такие как гамма-нож, криоабляция, сфокусированный ультразвук высокой интенсивности (high-intensity focused ultrasound, HIFU). Технология HIFU считается одной из перспективных неинвазивных методик лечения рака молочной железы. Она предусматривает воздействие серии импульсов ультразвукового излучения высокой интенсивности на биологическую ткань, приводящее к тепловой абляции/некрозу обрабатываемой опухоли. Типичные длительности единичного импульса составляют от миллисекунды до нескольких секунд, интенсивность, меняющаяся на поверхности излучателя от долей до десятков Вт/см², способна достигать в точке фокуса десятков кВт/см². Геометрически источник ультразвука может содержать от одной до нескольких сотен секций, расположенных на поверхности сферического сегмента. Программа обработки опухоли заданного размера требует задания параметров единичного импульса, числа импульсов в серии, последовательности включения импульсов и локализации точек фокуса отдельных импульсов.

В настоящий момент, широко варьируются как параметры источников ультразвука, так и варианты “наполнения” программ обработки [1,2]. Правильный выбор параметров определяет качество терапии опухоли, результатом которой должен являться некроз всего объёма опухоли. При этом здоровая ткань должна быть наименее затронута в результате HIFU воздействия.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию воздействия возможных программ обработки на заданный объём биологической ткани с параметрами, характерными для тканей грудной клетки. Предполагается, что единичный импульс характеризуется умеренной мощностью, когда влиянием нелинейных эффектов, сопровождаемых формированием высокоамплитудных ударных волн, можно пренебречь [2]. Предполагается, что ткань имеет однородную структуру; интенсивность излучения внутри ткани аппроксимируется на основе расчетов ультразвукового поля многоэлементного излучателя при различных положениях фокуса с использованием интеграла

^(*) Н.Ю. Быков, bykov_nyu@spbstu.ru

Рэля. Размер области тепловой абляции определяется с использованием концепции тепловой дозы, исходя из которой, абляция биологической ткани наступает при температуре 43С, поддерживаемой в ткани на протяжении 240 мин (либо 56С на протяжении 1.76с). Для определения температурных полей в ткани численно решается уравнение теплопроводности, описывающее трехмерный нестационарный процесс распространения тепла. Для моделирования использован метод конечных разностей (схема предиктора-корректора второго порядка точности по времени и пространству) [3].

Рассмотрены программы обработки опухоли с характерным масштабом порядка 1 см. Программы предусматривают: число импульсов в серии от 1 до 50, длительность импульса от 10 мс до 2с, интенсивность одиночного импульса в точке фокуса от 100 до 1000 Вт/см². Пространственное распределение интенсивности соответствует параметрам 2 МГц 128 элементного излучателя производства Sonic Concepts Model H-302. На примере единичных импульсов в работе обсуждается влияние параметров излучения на размеры области некроза. Рассмотренные программы обработки предусматривают различные последовательности локализации фокальных областей во времени в объеме опухоли. Обсуждается влияние особенностей программы на размеры области тепловой абляции ткани.

Расчеты выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного центра “Политехнический”.

Проект реализован при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Уникальный идентификатор - RFMEFI57818X0263.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов Л.Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине. М.: Фазис, 2013. 656с.
2. Андрияхина Ю.С., Карзова М.М., Юлдашев П.В., Хохлова В.А. Ускорение тепловой абляции объемов биологической ткани с использованием фокусированных ультразвуковых пучков с ударными фронтами // Акустический журнал, 2019. Т. 65. № 2. Р. 147.
3. А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784с.

T.A. Andreeva, A.B. Belyankin, A.E. Berkovich,
N.Y. Bykov, S.V. Kozyrev, A.Ya. Lukin
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

THERMAL ABLATION OF BIOLOGICAL TISSUE BY HIGH INTENSITY ULTRASOUND

АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА АТМОСФЕРНОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Целью данного исследования является организация атмосферной сублимационной сушки жидких пищевых продуктов. В настоящее время жидкие продукты сушат сублимацией на стенде следующим образом: жидкий продукт, например, молоко разливают на противни и замораживают. Замороженный слой отделяют от противня и разбивают на крупные куски. Затем куски гранулируют на электромеханической терке. При данном способе гранулирования продукт контактирует с металлом, вследствие чего, в продукте остаются его частицы, что ухудшает качество продукта. Мы поставили перед собой задачу разработать и осуществить такой способ заморозки продукта, при котором мы могли бы получить гранулы продукта без контакта с металлической теркой. В качестве объекта сушки мы использовали 3% коровье молоко.

Качество сушки напрямую зависит от параметров сушильного материала, в нашем случае, нам необходимо было получить замороженные гранулы молока определенных параметров, для этого на первом этапе нами было принято решение производить замораживание продукта с помощью твердого диоксида углерода. Для этого нами была изготовлена вибрационная машина, представленная на Рис.1, а.

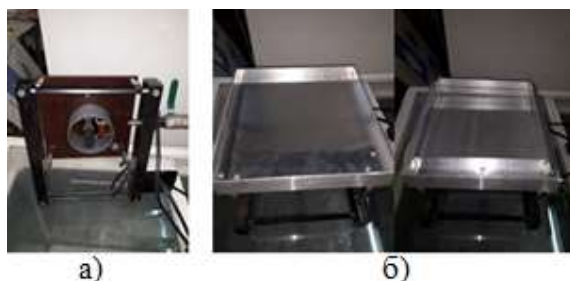


Рис. 1 Вибрационная машина (вид снизу)

Вибрационная машина была снабжена съемным алюминиевым лотком и съемной алюминиевой сеткой с отверстиями, определяющим размером 3 мм. Чтобы отсеять наиболее мелкие гранулы продукта на вибрационную машину был установлен поддон, затем металлическая 3-х миллиметровая сетка, на которой находился диоксид углерода (рис. 1,б). Таким образом, при разбрызгивании продукта на диоксид углерода, находящийся на сетке, гранулы размером больше 3 мм. оставались на сетке, а мелкие скапливались в поддоне.

^(*) Д.Е. Попов, ruhhan29@gmail.com

Сушка производилась в атмосферной сублимационной сушильной установке (рис. 2). Бункерная сушилка расположена в холодильной камере (температура в холодильной камере -16°C). Атмосферная сублимационная установка состоит из корпуса низкотемпературного морозильника, воздухоохладителя, осевого вентилятора и бункерной сушилки. Бункерная сушилка в свою очередь оснащена радиальным вентилятором и нагревателем. Установка работает в автоматическом режиме. Для определения влажности продукта при сушке нами периодически производилась остановка процесса. Для этого открывали дверь и брали пробы для автоматического влагомера.

После предварительной заморозки гранулы размещались на сетчатых противнях и загружались в бункерную сушилку, где происходила сублимация, т. е. удаление вымороженной влаги. После достижения заданной остаточной влажности (20%), продукт направлялся на досушивание, где его температура доводилась до достижения им температуры 40°C и заданной влажности, 5%.

В итоге мы получили сушеное молоко, без ухудшения его пищевых качеств, конечная влажность продукта составила 5,2 %, что является допустимой влажностью для сушеных продуктов. Слипания порошка, что свидетельствует о недосушивании, не наблюдалось, также не наблюдалось и изменение цвета (покоричневения), что свидетельствует об отсутствии перегрева. Следовательно, данный метод можно использовать для производства термолабильных гранулированных сушеных продуктов из биологических объектов, находящихся в жидком состоянии. Молоко было использовано нами для моделирования свойств жидких биологических материалов.



Рис. 2. Камера атмосферной сублимационной сушильной установки (справа) и бункерная сушилка (слева)

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.П. Камовников и др. Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов. Москва, Колос, 1994. 253с.

A.V. Antipov, A.R. Alyautdinov, A.I. Egorova, D.E. Popov
Moscow Power Engineering Institute

IMPLEMENTATION IN PROCESS OF GRANULATED ALIMENTARY PRODUCT ATMOSPHERIC SUBLIMATION DEHYDRATION

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ЕЕ РАБОТЕ В БЕСПАРОВОМ И МОТОРНОМ РЕЖИМАХ

В процессе эксплуатации паро-газовых установок (ПГУ) большой мощности при их работе на частичных нагрузках выявились проблемы, в частности: ухудшение экологических характеристик, заметное снижение надежности и экономичности работы газовых турбин и ПГУ в целом и т.д., ограничивающие участие их в регулировании частоты и мощности энергосистемы. Сложившаяся практика останова оборудования при прохождении провалов нагрузки приводит к его повышенному износу, вызывающему снижение экономичности и надежности. Особенно трудно предотвратить снижение надежности и экономичности турбоагрегатов при быстрых пусках, необходимых для регулирования нагрузки энергосистемы. Перевод энергоблоков в режим с минимальной нагрузкой в пределах регулировочного диапазона не всегда оправдан как с точки зрения экономичности, так и надежности.

Альтернативным способом вывода паровых турбин в резерв с полным снятием активной нагрузки является моторный режимы (МР). Исследования, результаты которых изложены в [1], показали значительные преимущества МР по отношению к остановочно-пусковому режиму и режимам разгрузки по показателям надежности, экономичности и маневренности при длительности провала нагрузки 6-8 часов. Вместе с тем применение МР требует охлаждения проточных частей турбин для исключения разогрева металла рабочих и направляющих лопаток, обусловленного потерями мощности на трение и вентиляцию. На основе математической модели гидродинамических процессов в ступени паровой турбины в беспаровом и моторном режимах в [2] при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой получены расчетные выражения расчета температуры пара и металла в ступенях турбины. При моделировании не учтено также температуры потоков пара, поступающих в проточную часть турбины через концевые уплотнения и пара, подаваемого для охлаждения проточной части.

Очевидно, что такое допущение при переходе на расчет температур пара в отсеках турбины приведет к определенной погрешности расчета. Для учета

^(*) Э.К.Аракелян, Edik_arakelyan@inbox.ru

влияния их на энтальпию пара после смешения основного потока пара с потоком поступающего из вне получена зависимость

$$h_{CM} = h_{ПО} \left(\frac{1 + g_B \frac{h_B}{h_{no}}}{1 + g_B} \right)$$

$h_{ПО}, h_{CM}$, -энтальпия основного пара до и после смешения потоков; h_B - энтальпия пара внешнего потока в точке смешения; $g_B = \frac{G_B}{G_{ПО}}$ - относительный расход внешнего потока пара; $G_{ПО}, G_B$ - расходы пара основного и внешнего потоков.

Анализ приведенной зависимости показывает, что учет данного фактора может снизить температуру основного потока пара перед ступенью (при $\frac{h_B}{h_{ПО}} < 1,0$), а может увеличить ($\frac{h_B}{h_{ПО}} > 1,0$). Проведенные расчеты показали, что наибольшее влияние оказывают потки пара, поступающие в проточную часть из концевых уплотнений. Для исключения такого влияния параметры пара на концевые уплотнения необходимо выбирать таким образом, чтобы выполнялось условие $\frac{h_B}{h_{ПО}} = 1,0$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №18-08-01090а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Mezin S.V., and Andryushin K.A/ The Specificity of Steam Turbine Stages Working in the Low Mass Flow Rate Regimes and Keeping them in the Simulaton of Hydrodynamic Processes in the Turbine in Steamless and Motor Modes // IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW)12/i 44, 00008 (2018).
2. Arakelyan, É.K., Bezdelgin, I.O., Andryushin, K.A Temperature State of the Flow-Through Part of a T-125/150 PGU-450 Steam Turbine Operating in the Steam-Free and Motor Regimes. Power Technology and Engineering, 2015, p.291-295.

E.K. Arakelyan, A.V. Andryushin, G.A. Pikina,
S.V. Mezin, A.A. Kosoy
NRU «MPEI» Moscow, Russia

MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES OF A FLOWING PART OF THE STEAM TURBINE WHEN IT IS WORKING IN STEEMLESS AND MOTOR MODES

Э.К. Аракелян¹ (*), М.М. Султанов², В.Р. Сабанин¹, Ю.А. Горбань²
¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
²Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Волжск, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС ПУТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЭП

Управление технологическими процессами современной ТЭС требует оперативных расчетов текущей эффективности работы оборудования (расчет ТЭП) с использованием результатов множественных прямых и косвенных измерений технологических параметров. Такой расчет даёт необходимую информацию для обеспечения экономичной эксплуатации оборудования, позволяет прогнозировать его ремонт, а также оценить качество работы эксплуатационного персонала, дать оценку проведению наладочных и эксплуатационных испытаний. Известной проблемой обеспечения приемлемой ценности результатов расчетов и использования их для принятия оптимальных управленческих решений является достоверность результатов измерения технологических параметров. Как правило, существующие алгоритмы расчета ТЭП ограничиваются фиксацией их значений со значительной погрешностью, обусловленной погрешностью исходной информации и невозможностью сведения прямых и обратных балансов тепла на уровне отдельных агрегатов и блока в целом между собой. Для повышения достоверности исходной информации впервые предлагается использовать интеллектуальный алгоритм решения задачи получения оценок значений технологических параметров по результатам измерений с использованием системы уравнений материальных и тепловых балансовых соотношений агрегатов и участков и всей станции. В настоящее время существуют методы оценки точности средств измерения по показателям неопределенности [1]. Показатель неопределённости — это эквивалент класса точности, учитывающий все виды возникающих в конкретных производственных условиях погрешностей.

В настоящей работе предлагается использовать алгоритм для решения задачи получения оценок значений технологических параметров по результатам измерений с использованием системы уравнений балансовых соотношений агрегатов, участков и всей станции. Предлагаемый подход обеспечивает необходимую достоверность всех основных параметров, необходимых для сведения тепловых и энергетических балансов по каждому агрегату и по станции в целом, расчета ТЭП и проведения всех необходимых расчетов по оптимальному управлению технологическими процессами и режимами работы

(*) Э.К.Аракелян, Edik_arakelyan@inbox.ru

энергооборудования как на уровне электростанции, так и на уровне энергоблоков. Показателем достоверности оценок в предлагаемом алгоритме с использованием нейронных технологий является выполнение материальных и энергетических балансов для заложенной в алгоритм технологической схемы производственного комплекса при минимальной сумме отклонений внутри нормированных погрешностями измерительных каналов диапазонов неопределенности искомых оценок от измеренных значений технологических параметров.

Для дальнейшего повышения достоверности информации предлагается сократить оперативный интервал усреднения технологических параметров, входящих в расчет ТЭП. В настоящее время [2] определяет, что длительность оперативного интервала расчета ТЭП должна составлять 15 минут. Предлагаемое сокращение оперативного интервала возможно за счет комплексного подхода: сокращения периода усреднения и использования вместо усреднения другого, более эффективного алгоритма. Исследование динамики и зависимости параметров для блоков с прямоточными котлами и ТЭЦ с барабанными котлами показывает, что максимальный период рассогласования не превышает трех минут, а анализ среднеквадратической погрешности отклонения усредненных значений технологических параметров показал, что оптимальным является алгоритм усреднения скользящим средним.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №19-19-00601.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Sabanin V.R., Mezin S.V., Pashchenko F.F. Use of modern information technologies to improve energy efficiency of thermal power plant operation. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012286.
2. РД 34.09.453 Типовой алгоритм расчета ТЭП мощных отопительных ТЭЦ. Служба передового опыта и информации Союзтехэнерго Москва, 1983. – 70 с.

E.K.Arakelyan¹, M.M.Sultanov², V.R.Sabanin¹, Yu.A.Gorban²

¹NRU «MPEI» Moscow, Russia,

²Branch of NRU «MPEI» VOljsk, Russia

THE ENERGY EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT OF THERMAL POWER PLANTS THROUGH OPERATIONAL MANAGEMENT OF TEI

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ДИСЦИПЛИН ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-КОНСТРУКТОРОВ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

На данный момент в России активно развивается производство климатической техники. Среди основных типов оборудования, так или иначе связанного с работой климатической техники, производство которого локализуется на территории Российской Федерации можно отметить:

- Модульные насосные станции;
- Каркасно-панельные вентиляционные установки;
- Холодильные машины;
- Вентиляторные доводчики;
- Воздушно-тепловые завесы;

Речь в данном случае идет о совокупной кооперации производств для сборки конечных изделий. В период с 1991 по 2014 года, производство данных изделий развивалось достаточно медленными темпами. Было всего несколько крупных заводов, которые занимались сборкой данной техники из готовых комплектующих, чаще всего импортного производства. Производств полного цикла по России насчитывалось меньше пяти.

Из основных производителей, которые занимаются всем ассортиментом перечисленного оборудования, на сегодняшний день можно отметить следующие компании:

- KORF/NED;
- ВЕЗА;
- WHEEL;
- Термокул;
- VKT;
- Русклимат.

Эти компании по данным [1] занимают лидирующие позиции на рынке по производству и продаже оборудования перечисленных типов.

При этом производства локализируются все сильнее, переходя от сборочного производства и копирования импортных аналогов, к собственным инженерным разработкам. Отсутствие или слабая развитость производств данных направлений в период с 1991 по 2014 год создало дефицит специалистов в данной области, способных осуществлять разработки полного цикла по всему комплексу

^(*) А.А. Арбатский, arbatsky1985@mail.ru

перечисленного оборудования, т.е. обладающих комплексными знаниями и имеющими практический опыт в следующих областях:

- Тепло-массообменное оборудование;
- Холодильная техника и трансформация тепла;
- Технологии металлообработки;
- Конструирование машин и механизмов;
- Технологии обработки изделий из пластика и композитных материалов;
- Системы и установки искусственного климата.

Это только самые основные области знаний, которые необходимы для реализации НИОКРа полного цикла, при разработке перечисленных типов оборудования.

На сегодняшний день ведущими ВУЗами осуществляется подготовка специалистов по всем перечисленным областям знаний по отдельности и в рамках большого комплекса специализаций, но очень мало внимания уделяется взаимосвязи между данными дисциплинами и на сегодняшний день не существует ВУЗа выпускающего готовых специалистов по разработке перечисленных категорий климатического оборудования.

В рамках данной статьи были проанализированы дисциплины, преподаваемые по специальности «Промышленная теплоэнергетика», по специализации «Системы и установки искусственного климата», их взаимосвязь на текущий момент и выдвинуты предложения по приведению общей программы подготовки инженеров, к требованиям современных производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данные маркетинговых исследований климатического рынка компании «Литвинчук Маркетинг» на 2018 г. <http://www.litvinchuk.ru/>

A.A. Arbatskiy, V.S. Glazov
Moscow Power Engineering Institute, Moscow

ANALYSING OF THE EDUCATION SYSTEM FOR DESIGN-ENGINEERS OF CLIMATIC EQUIPMENT SUBJECT TO REQUESTS OF THE MODERN INDUSTRY

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ LES ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В данной работе с помощью LES метода проведено исследование турбулентного течения электропроводящей жидкости в канале квадратного сечения при воздействии поперечного магнитного поля. Верифицировались четыре подсеточные модели (SGS): Смагоринского с демпфирующей пристеночной функцией Пиомелли (SMP), когерентная (CSM), WALE и авторская модификация гибридной модели, основанной на уравнении для турбулентной энергии (KDES) [1]. Расчеты проведены с помощью авторского CFD кода ANES [2]. Результаты сравнивались с данными прямого моделирования турбулентности (DNS) [3].

Расчеты МГД-течения выполнены для двух вариантов постановки задачи: канала с периодическими граничными условиями вход-выход (Var.1) и для начального участка канала (Var.2). В первом варианте использовалась авторская модификация алгоритма поддержки постоянного расхода в канале. Во втором случае турбулентный контент на входе в канал создавался предвключенным генератором (PIG).

Сечение канала $D \times D$ расположено в плоскости координат x - y , течение направлено в положительном направлении оси z . Длина канала с магнитным полем для Var. 1 принималась равной $L = 16 \times D$, для Var.2 - $L = 60 \times D$. Постоянный вектор индукции магнитного поля \mathbf{V} направлен вдоль оси y . В области PIG ($L_{PIG} = 5 \times D$) магнитное поле отсутствует. Стенки канала непроводящие. Две вертикальные стенки (параллельные оси y) обогреваются с постоянной плотностью теплового потока q_w .

Проведены расчеты для числа Рейнольдса $Re = 5602$ и диапазона чисел Гартмана Ha от 0 до 30. В качестве теплоносителя рассматривалась среда с числом Прандтля $Pr = 4.1$, типичным для расплава солей. Свойства среды принимались постоянными.

В расчетах использовались декартовы сетки со сгущением к стенкам канала, в продольном направлении z сетка была равномерной. Число ячеек для Var.1 составляло $(N_x, N_y, N_z) = (98 \times 98 \times 150)$, для Var.2 - $(98 \times 98 \times 650)$.

В расчетах получены поля осредненной скорости, температуры, а также их пульсационные характеристики. Для МГД течения в поперечном магнитном поле при $Ha = 21.2$ и $Re = 5602$ в канале прямоугольного сечения результаты

(* М.В. Макаров, makarovmv2000@yandex.ru

расчетов по моделям CSM и WALE показали наилучшее соответствие данным DNS [3] (рис.1). Модели SMP и KDES предсказали более интенсивное подавление турбулентности за счет магнитного поля. Однако числа Гартмана, при которых по моделям SMP и KDES происходит полная ламинизация потока, оказались равными ~ 22.4 , что соответствует нижней границе диапазона по данным DNS. Модели CSM и WALE, напротив, предсказывают меньшую интенсивность подавления турбулентности, при этом критическое число Гартмана ~ 30 , что соответствует верхней границе по данным DNS.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации № 14.Z50.31.0042.

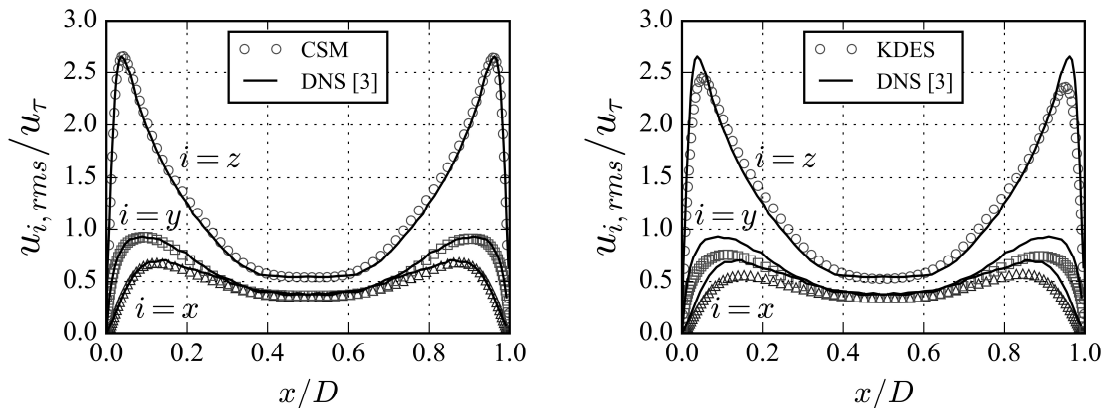


Рис. 1. Профили интенсивности пульсаций компонент скорости в сечении $y/D = 0.5$ для моделей CSM и KDES при $Ha=21.2$

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов В.И., Макаров М.В., Яньков Г.Г., Минко К.Б. Использование гибридной LES/RANS-модели турбулентности для исследования процессов теплообмена при течении жидкости с переменными свойствами в трубах // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену, М.: Издательский дом МЭИ, 2018, т. 1, с. 137 - 142.
2. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru/> (дата обращения: 10.04.2019).
3. Chaudhary R., Vanka S.P. and Thomas B.G. Direct Numerical Simulation of Magnetic Field Effects on Turbulent Flow in a Square Duct // Phys. Fluids. 2010. V. 22. Is. 6. 075102.

V.I. Artemov, M.V. Makarov, K.B. Minko, G.G. Yankov
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia

LARGE EDDY SIMULATION OF THE CONDUCTIVE LIQUID TURBULENT FLOW UNDER THE INFLUENCE OF A TRANSVERSE MAGNETIC FIELD IN CHANNEL

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ CO₂
СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ
В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LES-ТЕХНОЛОГИИ**

В данной работе представлены результаты численного анализа турбулентного течения CO₂ сверхкритического давления (СКД) в вертикальной обогреваемой трубе с использованием метода моделирования крупных вихрей (LES) и нескольких моделей для подсеточной вязкости (SGS-моделей). Для численного моделирования гидродинамики и теплообмена в круглой трубе использовались неструктурные декартовы сетки с локальным анизотропным дроблением. Верификация SGS-моделей выполнена с привлечением данных прямого численного моделирования (DNS) J. Bae [1] и экспериментальных результатов работы J. Kim [2]. Для моделирования использовался авторский CFD код ANES [3].

В работах Н. Nemati [4] и J. Yan [5] приводятся результаты DNS моделирования подъемного течения CO₂ СКД в вертикальной обогреваемой трубе для режимов, предложенных в работе [1]. Для нескольких режимов наблюдается заметное различие результатов, причины которых не вполне ясны. В данной работе для моделирования были выбраны три режима [1]: режим «В», «С» и «G», а также один из режимов [2]. Для моделирования использовались сетки с числом ячеек порядка 3 млн для режимов [1] и 12 млн для режима [2].

В докладе обсуждаются результаты, полученные с использованием трех SGS моделей: Смагоринского с поправкой Пиомелли [6] (SMP), «когерентной» версии модели Смагоринского (CSM) [7] и модифицированной авторами гибридной модели, основанной на уравнении для турбулентной энергии (KDES), подробно изложенной в [8].

В качестве примера на рисунке 1 показаны зависимости локального числа Нуссельта $Nu = q_w / (T_w - T_m)$ и коэффициента трения $c_f = 2\tau_w / (\rho_{in} u_{in}^2)$ для режимов «В» и «С», рассчитанные с использованием модели Смагоринского с демпфирующей функцией Пиомелли SMP [6] (T_w - температура стенки, T_m - среднemasсовая температура, τ_w - трение на стенке канала, ρ_{in} , u_{in} - плотность и средняя скорость среды на входе в трубу, z - продольная координата, отнесенная к радиусу трубы).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № №17-08-01007-а.

^(*) В.И. Артемов, viartemov@yandex.ru

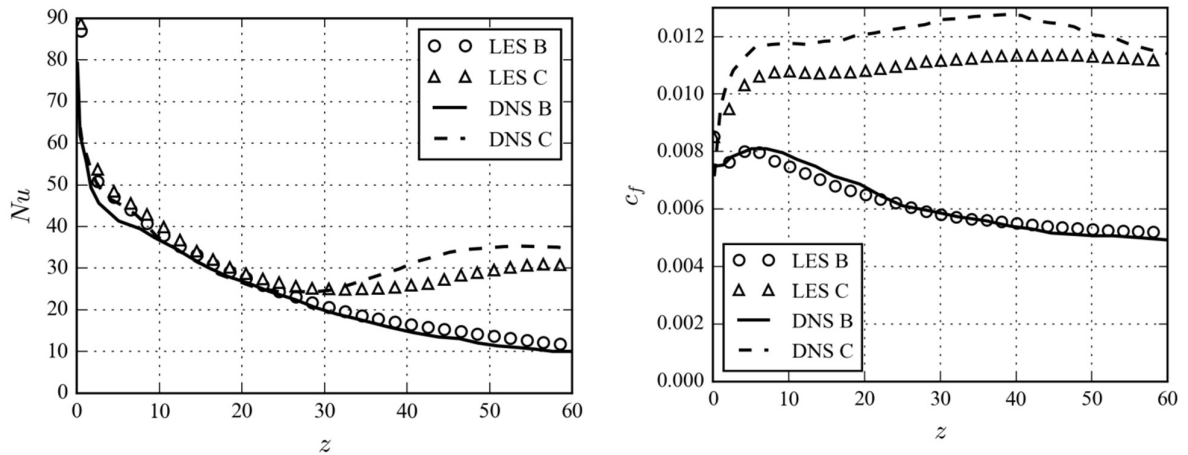


Рис. 1. Распределения локального числа Нуссельта и коэффициента сопротивления по длине трубы, полученные с использованием модели SMP

ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Bae, J. Y. Yoo, H. Cho. Direct numerical simulation of turbulent supercritical flows with heat transfer // *Physics of Fluid*. - 2005. - V. 17: P. 105104-1-105104-24.
2. J.K. Kim, H.K. Jeon, J.Y. Yoo, J.S. Lee. Experimental study on heat transfer characteristics of turbulent supercritical flow in vertical circular/non-circular tubes // NURECH-11. Avignon. France. October 2-6. 2005. Paper 265.
3. CFD код ANES. <http://anes.ch12655.tnweb.ru>.
4. Nemati H., Patel A., Boersma B. J. and Pecnic R. Mean statistics of a heated turbulent pipe flow at supercritical pressure // *Int. J. Heat Mass Transf.* - 2015. - V. 83. - P. 741 - 52.
5. J. Yan, W. Wang, P. Jiang, S. He. Direct numerical simulation of convective heat transfer in a vertical pipe for supercritical pressure CO₂// presented at the 16th International Heat Transfer Conference, Beijing, China, August 10-15, 2018.
6. Piomelli U., Zang T., Speziale C., Hussaini M. On the large-eddy simulation of transitional wallbounded flows // *Phys. Fluids A: Fluid Dynamics*. 1990. V. 2. P. 257–265.
7. H. Kobayashi. The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow// *Phys. Fluids* 17, 045104, 2005.
8. В.И. Артемов, М.В. Макаров, Г.Г. Яньков, К.Б. Минко. Использование гибридной LES/RANS-модели турбулентности для исследования процессов теплообмена при течении жидкости с переменными свойствами в трубах // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену, М.: Издательский дом МЭИ, 2018, т. 1, с. 137 - 142.

V.I. Artemov, M. V. Makarov, G. G. Yankov, K. B. Minko
National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)

LARGE EDDY SIMULATIONS OF SUPERCRITICAL CO₂ TURBULENT FLOW IN A VERTICAL HEATED PIPE

О ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ИСПАРЕНИЯ И КИПЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Процессы испарения и кипения капель рабочих жидкостей лежат в основе многих процессов каплеструйного испарения для охлаждения энергетических и электронных устройств [1,2]. Пленочное кипение жидких капель на высокотемпературных поверхностях (эффект Лейденфроста) в последние годы привлекает внимание многих научных групп [3,4]. Однако, еще до температуры кипения (точка Лейденфроста) могут наблюдаться в режимах испарения и кипения многие важные эффекты, включая изменение характера испарения от режима постоянного контактного угла до режима постоянной контактной линии. Выше точки Лейденфроста, для некоторых поверхностей (мезо- и наноструктурированных) могут наблюдаться явления срыва эффекта Лейденфроста, что приводит к резкому росту диссипации тепла в подобных режимах. В данной работе исследованы процессы испарения и кипения на графеновых нанокompозитах, которые сегодня рассматриваются как одни из самых перспективных в качестве функциональных энергетических наноматериалов.

Для проведения экспериментов были изготовлены различные образцы графеновых нанокompозитов, включая спеченные графеновые таблетки (давление спекания 200-300 бар, температура 150-180 °С; установка Buehler SimpliMet 1000), а также таблетки графеновых нанохлопьев с добавлением наночастиц BN, AlN и Al₂O₃. Общий вид таблеток представлен на рис.1; здесь же приведена электронная микроскопия поверхности одного из нанокompозитов.

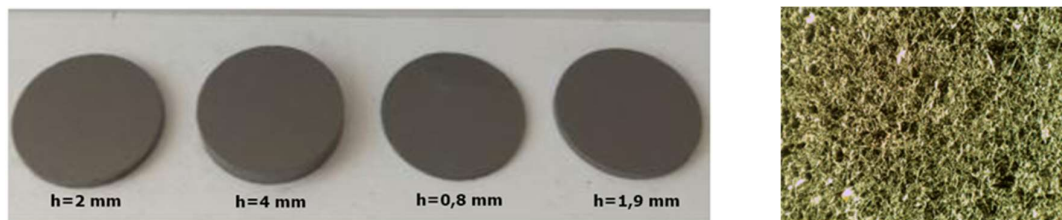


Рис. 1. Образцы графеновых нанокompозитов

Были проведены измерения контактного и скорости испарения; измерения проводились по методике, изложенной в [1]. Температура нанокompозитных поверхностей измерялась контактным (термопарный) и бесконтактным (пирометр) методами. Были найдены температурные зависимости контактных углов вплоть до температуры кипения для капель воды 1,5-2,5 мм. На рис.2.

^(*) А.С. Дмитриев, asdmitriev@mail.ru

представлены такие зависимости для графеновых нанокомпозитов с наночастицами BN (2%) и AlN (2%). Нетрудно видеть, что поведение контактных углов сильно различается: если в первом случае наблюдается уменьшение контактного угла при малых временах испарения, а затем выход на квазипостоянный режим контактного угла (при этом контактная линия уменьшается), то во втором случае режим непостоянства контактного угла возникает только при больших временах испарения.

В режимах кипения наблюдаются различные подрежимы, которые в настоящее время до конца не описаны. Однако, при температуре, выше температуры Лейденфроста обнаружены режимы без левитации капель, т.е. срыв стандартного режима Лейденфроста и переход к активному пузырьковому и даже взрывному кипению. Важно также отметить, что были обнаружены на графеновых нанокомпозитах режимы разрушения поверхностного слоя, по-видимому, из-за генерации микропузырьков в мезопористом слое такого материала. Все эти вопросы чрезвычайно важны для разработки технологий струйного охлаждения различных устройств.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 17-19-01757).

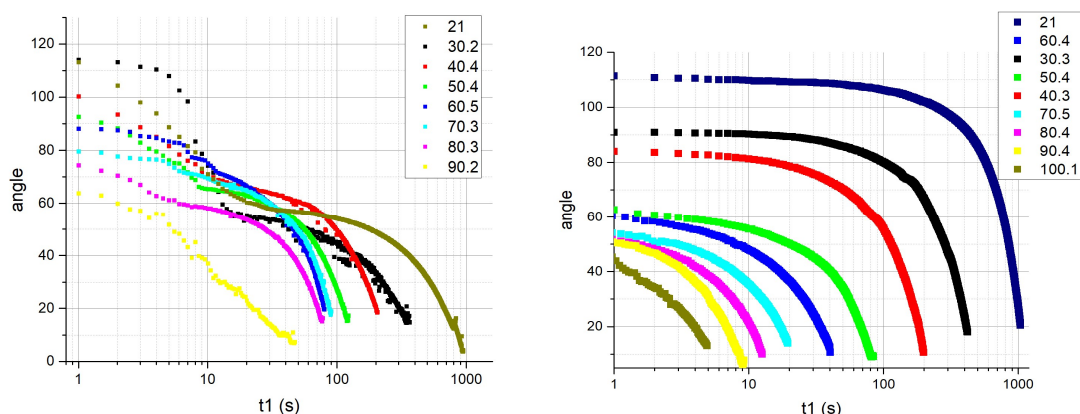


Рис. 2. Изменение контактных углов со временем при испарении

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. Дмитриев Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. P. Zhang, F. Lv. A review of the recent advances in super-hydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*, 82, 2015, P. 1068-1087.
3. S. Sajadi, P. Irajizad, V. Kashyap, N. Farokhnia, H. Ghasemi. Surfaces for high heat dissipation with no Leidenfrost limit. *Appl. Phys. Lett.* July 2017. DOI: 10.1063/1.4993775.
4. M. Chen, Z. Jia, T. Zhang, Y. Fei. Self-propulsion of Leidenfrost droplets on micropillared hot surfaces with gradient wettability. *Applied Surface Science*. 433. (2018) 336–340.

D.D. Babenko, A.S. Dmitriev, I.A. Mikhailova
National Research University «MPEI»

THERMOHYDRODYNAMIC PROCESSES OF DROPLET EVAPORATION AND BOILING ON FUNCTIONAL NANOMATERIALS SURFACES

**ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ
ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В ТРУБАХ**

В исследовании теплообмена и движения конденсата на внутренней поверхности труб впервые применены гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП) [1]. Изготовлена экспериментальная установка для исследования конденсации пара внутри труб. Пар подавался как снизу, так и сверху. Теплоносителями были насыщенный водяной пар с температурой, близкой к 100 °С, и вода из водопровода с температурой 22 °С.

Для традиционной подачи пара сверху получены зависимости плотности теплового потока от времени (рис. 1) и спектральные плотности мощности для пульсаций плотности теплового потока. Видны пульсации плотности теплового потока на ГГДТП №3 и ГГДТП №4, что соответствует волнистому течению пленки конденсата. Характер изменения этих величин соответствует данным литературы [2].

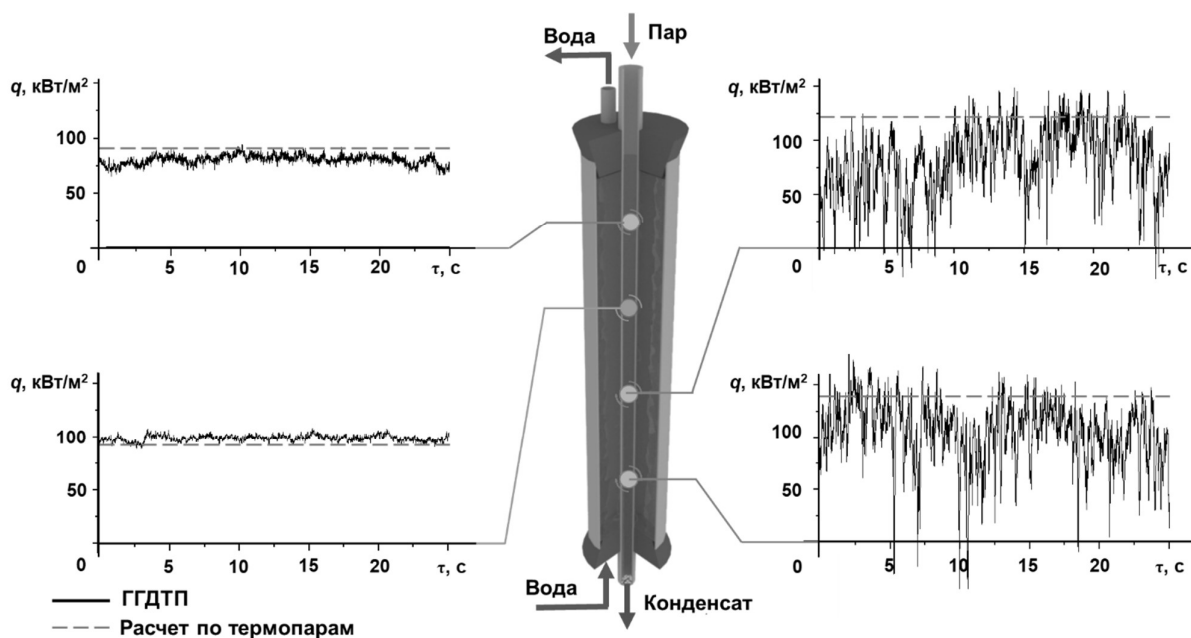


Рис. 1. Временные теплограммы при переменном режиме конденсации.

^(*) А.Ю. Бабич, babich1994@mail.ru

Подача пара снизу редко встречается в традиционной энергетике, однако широко распространена в энергетике геотермальной, где важны особенности конденсации в вертикальных трубах геотермальных станций. Такие режимы встречаются и при аварийной работе атомной станции, имеющей парогенераторы с U-образными трубками.

Подачу пара снизу мы исследовали ранее; результаты опубликованы в работах [3,4]. В новых исследованиях исправлены технические недочеты, опыты проведены более детально.

Сравнение с данными литературы [5] свидетельствует об адекватности предложенного подхода. Метрологический уровень эксперимента, относительная неопределенность которого не превысила 15%, делает результаты доказательными и подтверждает применимость градиентной теплотометрии при исследовании конденсации пара на внутренней поверхности труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков // Основы градиентной теплотометрии // СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2012. – 203 с.
2. R. P. Salazar, E. Marschall. Statistical Properties of the Thickness of a Falling Liquid Film. Acta Mechanica 29, 239-255 (1978)
3. Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р., Субботина В.В., Сапожников С.З., Исследование теплообмена при конденсации методом градиентной теплотометрии, неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2017. С. 38-41.
4. V Y Mityakov, S Z Sapozhnikov, E R Zainullina, A Y Babich, O A Milto and K S Kalmykov, Gradient heat flux measurement while researching of saturated water steam condensation, Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012128
5. Д. А. Лабунцов. Физические основы энергетике. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 388 с.

A.Yu. Babich, E.R. Zainullina, S.Z. Sapozhnikov
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT IN STUDY OF HEAT TRANSFER DURING STEAM CONDENSATION INSIDE PIPES

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБОГРЕВА СУДОВЫХ ЦИСТЕРН

Одной из проблем при создании объектов морской техники, работающих в тяжелых арктических условиях, является предотвращение замерзания сред в цистернах при экстремально низких температурах, поскольку это может привести к повреждениям судна и его систем. Для решения указанной проблемы необходимо создание эффективных систем обогрева судовых цистерн.

Широко используемым методом борьбы с обледенением является обогрев жидкостей в судовых цистернах с помощью греющих змеевиков, теплоносителем в которых может быть пар, вода или органические теплоносители. Руководящий документ для расчетов систем подогрева был выпущен в 1985 году (РД5Р.113-85 «Система подогрева жидкостей в судовых цистернах. Правила проектирования») в котором при расчете теплоотдачи не рассматривается инверсия коэффициента температурного расширения воды при температурах около 0°C, а также не учитывается влияние корпусного набора (оробрения) внутри цистерны на теплопотери.

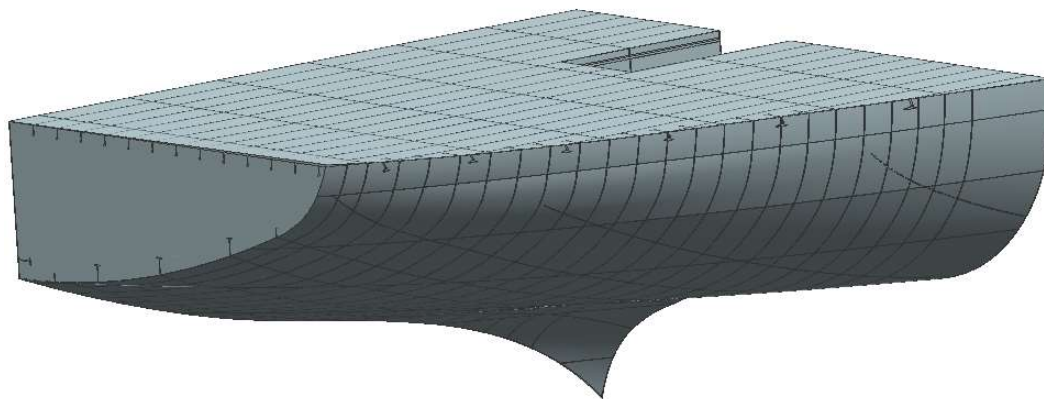


Рис. 1. Схема балластной цистерны

В докладе представлены результаты расчетного исследования по определению оптимального размещения греющих змеевиков в балластной цистерне сложной формы (см. рис. 1), характерной для ледоколов и судов

^(*) М.Н. Сыралёва, syraleva_masha@mail.ru

ледового класса (Arc 5 и выше). Численное моделирование особенностей свободно-конвективных течений около холодных стенок выполнено с учетом элементов корпусного набора (расчетная сетка показана на рис. 2). Расчеты с использованием суперкомпьютерных технологий в коммерческом пакете гидродинамического анализа Star-CCM+.

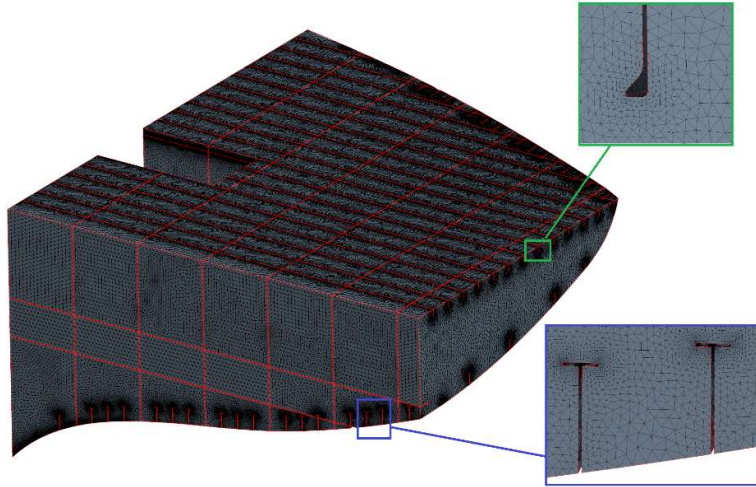


Рис. 2. Расчетная сетка на элементах корпусного набора

На основе выполненных расчетных исследований в докладе представлены предложения по усовершенствованию методики расчета системы обогрева судовых цистерн.

Сформулированы принципы повышения энергоэффективности системы обогрева балластных цистерн:

- использование нарастающего на внутренней поверхности цистерны слоя льда, как средства теплоизоляции, обеспечивающее снижение теплотерь из цистерны в окружающую среду;
- управление системой обогрева балластных цистерн по фактическому состоянию толщины льда на ее внутренней поверхности;
- поддержание температуры воды в цистерне на уровне незначительно превышающем температуру замерзания морской воды.

D.V. Bagaev, M.N. Syraleva, I.V. Kudinovich
Krylov State Research Centre

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF SHIP TANK HEATING SYSTEMS

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ОБОЛОЧЕК
ТОЛЕРАНТНЫХ ТВЭЛОВ ИЗ МОЛИБДЕНА В ВОДЯНОМ ПАРЕ**

После катастрофы на АЭС Фукусима Дай-Ичи (2011 г.) в мире активно исследуются материалы и конструкции ядерных топлив и оболочек твэлов легководных реакторов повышенной устойчивости (АТФ) в условиях аварий с потерей теплоносителя (ЛОСА). Для предотвращения пароциркониевой реакции исследуются модификации оболочек и возможность замены их материала (FeCrAl, SiC, Mo), а также UO_2 топлива на высокотеплопроводные тугоплавкие композиции (UN, U_3Si_2). Перспективным материалом оболочек толерантных твэлов (ТТ) являются молибден и его сплавы благодаря высоким температуре плавления ($T_{плMo} = 2620$ °С), теплопроводности [$\lambda_{Mo} \sim 90-110$ Вт/(м·К)] и прочности ($\sigma_{вMo} = 320$ МПа). Однако константа скорости, тепловой эффект паромолибденовой реакции (ПМР) при температурах от 1200 °С, а так же расхолаживание молибденовой оболочки при повторном заливе исследованы недостаточно [1]. В работах [2, 3] получены данные по константе скорости и тепловом эффекте ПМР образца оболочки из вакуумплавленного молибдена (МЧВП) ТТ с паром при температурах до 1500 °С и временах выдержки до 2 часов при фиксированном расходе.

В работе исследовано влияние на стенде ГАЗПАР режимных параметров потока на характеристики окисления МЧВП образцов оболочек ТТ в водяном паре при температуре 1187-1470 °С и длительности выдержки до $24,6 \cdot 10^3$ с. Образцы с номинальными размерами 11,7x6,7x4,5 мм ($D \times d \times L$) подготавливались нарезкой фрагментов исходной трубы. Химический состав МЧВП образцов состоял из 99,92 % Мо (масс.), примесей 0,005 % О и N и менее чем 0,03 % С. Предложена методика расчета эквивалентного времени окисления, учитывающая нестационарные режимы разогрева и расхолаживания образца оболочки.

Получены опытные данные по удельному уносу МЧВП от времени и константе скорости ПМР реакции образцов МЧВП оболочек при 1200 °С в диапазоне изменения расхода от 10 мг/с до 118 мг/с. Экспериментальные данные обобщены в виде зависимости константы скорости паромолибденовой реакции K_p от числа Рейнольдса (Re) потока водяного пара. Установлено, что в диапазоне чисел

^(*) С.С. Базюк, bazukss@sialuch.ru

$Re = 8 - 88$ при $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличение расхода пара практически не влияет на рост интенсивности ПМР реакции (рис. 1).

На основании расчетного анализа с применением методов молекулярно-кинетической теории подтверждено, что влияние потока пара на интенсивность окисления образца оболочки в условиях испытаний при $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет проявляться при сниженном числе Рейнольдса $Re < 5$ (соответствует расходу $G_{\text{п}} < 7$ мг/с). Выполнена оценка зависимости критической температуры, разграничивающей диффузионный и кинетический режимы окисления молибдена в водяном паре до 2000 K .

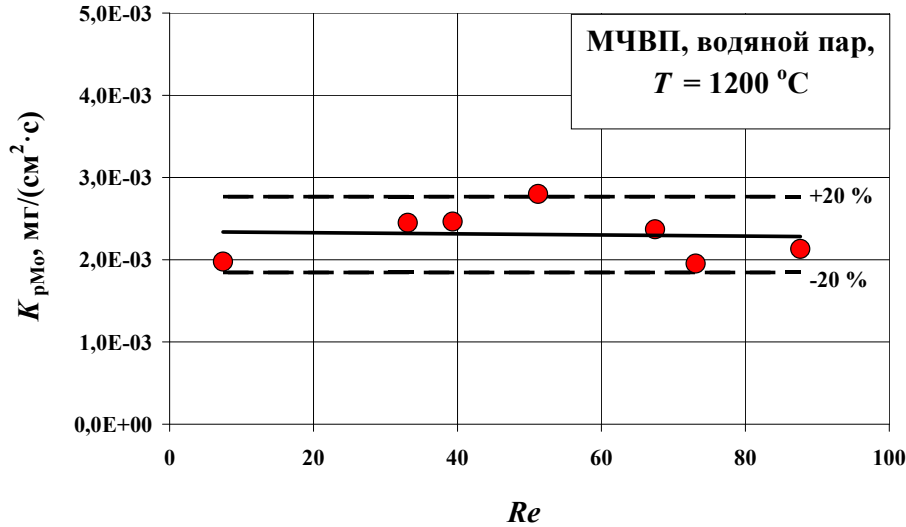


Рис. 1. Константа скорости ПМР реакции при $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

ЛИТЕРАТУРА

1. С.С. Базюк, Б. Н. Беспечалов, Д. С. Киселев, Ю. А. Кузма-Кичта и др. Характеристики высокотемпературного окисления и теплогидравлики толерантных твэлов в условиях LOCA. Науч.-техн. сбор. «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», № 4(14), 2018.
2. Базюк С.С., Киселев Д.С., Кузма-Кичта Ю.А., и др. Исследование теплофизических и коррозионных характеристик оболочек эксплуатируемых и перспективных твэлов легководных реакторов при аварии с потерей теплоносителя. Инж.-физ. журн, Т. 90, №1, 2017.
3. С.С. Базюк, Н.Я. Паршин, Е.Б. Попов и др. Исследование коррозионных характеристик штатных и перспективных оболочек твэлов легководных реакторов в условиях LOCA. // 10ая МНТК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", АО «ОКБ Гидропресс», 2017 г.

S.S. Bazyuk, Yu.A. Kuzma-Kichta, N.Ya. Parshin, K.K. Polunin, D.M. Soldatkin
FSUE «SRI SIA «LUCH», Podolsk, Russia

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF HIGH-TEMPERATURE STEAM OXIDATION OF ATF ROD CLADDINGS SPECIMENS

ДОСТИЖИМЫЙ ПЕРЕГРЕВ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ИХ РАСТВОРОВ

При получении, хранении и транспортировке криогенных жидкостей локальные теплопритоки и пульсации давления могут приводить к их перегреву за линию фазового равновесия. Большим перегревам способствуют малое содержание в криогенных жидкостях растворенных газов, хорошая смачиваемость ими большинства твердых материалов. Снятие перегрева может сопровождаться гидравлическими ударами и, как следствие, повреждением технологического оборудования.

Нами исследована кинетика спонтанного зародышеобразования в перегретых криогенных жидкостях (азот, кислород, водород, метан и др.), а также в ряде растворов (азот–кислород, кислород–гелий, метан–водород и др.). Опыты проведены в широком диапазоне давлений, включая отрицательные давления. Используются методы непрерывного изобарического нагрева, измерения времени жизни, импульсного перегрева жидкости в волне отрицательного давления. Это позволило перекрыть интервал по частоте зародышеобразования от 10^4 до 10^{25} $\text{с}^{-1}\text{м}^{-3}$. Исследуемые растворы относились к классам газонасыщенных (растворимость насыщающего компонента менее 1 моль%) и растворов с полной растворимостью компонентов.

Результаты экспериментов сопоставлены с классической теорией гомогенного зародышеобразования. Большинство из используемых в теории термодинамических параметров измерено на исследуемых образцах. Это поверхностное натяжение, давление насыщенных паров, плотность жидкой фазы в стабильном и метастабильном состояниях. Установлено, что при частотах нуклеации ниже $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^6$ $\text{с}^{-1}\text{м}^{-3}$ как в чистых жидкостях, так и растворах, имеет место существенное рассогласование теории и опыта по температуре достижимого перегрева, достигающее нескольких Кельвинов. Показано, что это расхождение связано с естественным радиационным фоном. Радиационная стойкость жидкости определяет пороговое значение частоты инициированного зародышеобразования J_u . Самую большую радиационную стойкость по отношению к естественному радиационному фону проявляет ксенон. Границе радиационной чувствительности этого вещества отвечает предельная частота зародышеобразования $J_u = 5 \cdot 10^4$ $\text{с}^{-1}\text{м}^{-3}$, в то время как у азота и кислорода это значение $J_u = 5 \cdot 10^6$ $\text{с}^{-1}\text{м}^{-3}$.

^(*) В.Г. Байдаков, baidakov@itp.uran.ru

В области спонтанного зародышеобразования достигнутые перегревы чистых криогенных жидкостей всегда систематически ниже их теоретических значений, если в классической теории гомогенного зародышеобразования не учтен «размерный эффект». Для исследуемых жидкостей величина рассогласования теории и опыта составляет по температуре 0.5–1.5 К. В рамках теории капиллярности Ван-дер-Ваальса, на основе результатов экспериментальных исследований термодинамических параметров криогенных жидкостей в стабильном и метастабильном состояниях, определена размерная зависимость поверхностного натяжения критических пузырьков. Показано, что в области спонтанного вскипания поверхностное натяжение паровых пузырьков криогенных жидкостей всегда меньше, чем на плоской межфазной границе. При положительных давлениях и частотах зародышеобразования 10^4 – 10^8 с⁻¹М⁻³ величина рассогласования составляет 5-7 %, при отрицательных давлениях, где радиусы критических пузырьков существенно меньше, она достигает 10-12 %.

В опытах с перегретыми растворами криогенных жидкостей установлено, что для газонасыщенных растворов (азот–гелий, аргон–водород и др.) достигнутые перегревы, как и в случае однокомпонентных жидкостей, ниже их теоретических значений. Для растворов с полной растворимостью компонентов (азот–кислород, метан–аргон и др.) ситуация иная. Здесь, вблизи азеотропного состава, зарегистрированы перегревы, превышающие их теоретические значения. По полученным данным рассчитано поверхностное натяжение критических пузырьков в растворе. В бинарных растворах простых жидкостей свойства паровых пузырьков описаны в рамках теории капиллярности Ван-дер-Ваальса. Рассчитана зависимость поверхностного натяжения парового пузырька γ от радиуса кривизны поверхности натяжения R . Показано, что в отличие от чистой жидкости, где поверхностное натяжение пузырька является монотонно убывающей функцией кривизны поверхности натяжения, вблизи азеотропного состава бинарного раствора функция $\gamma(R)$ имеет характерный максимум.

Результаты исследований предельных перегревов чистых криогенных жидкостей обобщены в рамках расширенного закона соответственных состояний. Получены уравнения, описывающие температуры достижимого перегрева криогенных жидкостей в широком интервале давлений и частот зародышеобразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00403) и Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 18-2-2-13).

V.G. Baidakov
Institute of Thermal Physics of Ural Branch of RAS

ATTAINABLE SUPERHEATING OF CRYOGENIC LIQUIDS AND THEIR SOLUTIONS

ОПТОВОЛОКОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Жидкости под отрицательным давлением метастабильны. Большие растяжения жидкой фазы наблюдаются в акустических полях, при отражении ударных волн от межфазной границы жидкость–пар, в насосном оборудовании и др. Описание процессов с участием растянутой жидкости требует знания ее теплофизических свойств.

Нами разработана и создана экспериментальная установка для определения показателя преломления и плотности метастабильных (растянутых) жидкостей, основанная на измерении коэффициента отражения от торца оптоволоконного датчика, погруженного в исследуемую жидкость. Растяжения в жидкости создавались при отражении импульса сжатия от межфазной границы жидкость–пар. Жидкость помещалась в цилиндрическую камеру, дном которой являлась дюралевая мембрана толщиной 1 мм. В процессе разряда малоиндуктивного конденсатора на спиральную катушку, прижатую к мембране, генерировался импульс сжатия длительностью 3-5 мкс. Передний фронт импульса менее 1 мкс, амплитуда – до 10 МПа. Зависимость амплитуды давления в импульсе сжатия от напряжения питания конденсатора определялась в калибровочных опытах с помощью импульсного датчика давления.

Чувствительным элементом оптоволоконного рефлектометра является торец световода с диаметром жилы 9 мкм, расположенный в центре камеры и погруженный в исследуемую жидкость на глубину 3-5 мм. Показатель преломления жидкости находился из уравнения Френеля по данным об отношении отраженного и опорного сигналов.

В качестве источника излучения использовался фотодиод. Измерения проводились на длине волны 1.3 мкм. Излучение фотодиода модулировано прямоугольными импульсами с частотой следования 2 кГц. Ослабление влияния отраженного сигнала на излучатель достигалось применением оптического изолятора. Отраженное излучение выделялось циркулятором с уровнем изоляции между каналами не менее 30 дБ. Сигнал с циркулятора измерялся специализированным фотоприемным устройством, которое преобразует оптический сигнал в электрическое напряжение. Впоследствии с помощью аналого-цифрового преобразователя сигнал переводился в цифровой вид. Поскольку оптический сигнал содержит полезную, слабо изменяющуюся на фоне постоянной оптической мощности, переменную составляющую,

^(*) В.Г. Байдаков, baidakov@itp.uran.ru

фотоприемное устройство компенсирует постоянный оптический сигнал и усиливает переменный.

Инерционность оптоволоконного датчика составляет единицы микросекунд. Быстродействующее фотоприемное устройство обеспечивает полосу пропускания не менее 1 МГц. Сигнал с фотоприемника обрабатывается аналого-цифровым преобразователем с динамическим диапазоном в 14 двоичных разрядов.

Как уже отмечалось, по коэффициенту отражения от границы датчик–жидкость рассчитывался показатель преломления. Затем по формуле ЛоренцЛоренца определялась плотность исследуемой жидкости.

По изотермам в интервале 10-70 0С с шагом 10 0С измерены показатель преломления и плотность жидкого н-бутана. При $t = 10-30$ 0С глубина захода в метастабильную область по давлению $\Delta p = p_s - p$, где p_s – давление фазового равновесия, составляла 8 МПа. На верхнем пределе температурного интервала – 4 МПа. В области стабильных состояний измерения были ограничены давлением в 8 МПа.

Заход в метастабильную область сопровождался понижением плотности жидкости. При $t = 10$ 0С снижение плотности составило 3 %. Погрешность определения плотности оценивается в 0.1 %.

По полученным p , ρ , T – данным построены изохоры, которые, в пределах погрешности эксперимента, во всем исследованном диапазоне параметров состояния являются прямыми линиями. В приближении прямолинейности, изохоры экстраполированы в глубину метастабильной области, где измерения не проводились. Найдена огибающая изохор, которая является спинодалью растянутой жидкости. Определены показатель преломления и плотность жидкого н-бутана на линии предельного растяжения, отвечающей частоте зарождения кавитационных пузырьков $J = 1020$ с-1м-3 [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00276).

ЛИТЕРАТУРА

1. Baidakov V.G., Vinogradov V.E., Pavlov P.A. Spontaneous cavitation in liquid n-butane at negative and positive pressures // Int. J. Heat Mass Transfer, 2017. V. 111. P. 624.

V.G. Baidakov, A.L. Gurashkin, A.A. Akashev
Institute of Thermal Physics of Ural Branch of RAS

FIBEROPTIC REFLECTOMETRY OF METASTABLE LIQUIDS

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ РАДИОАКТИВНЫЙ ГРАФИТ-CUO-NA₂CO₃-K₂CO₃-NaCl-KCl В АТМОСФЕРЕ АРГОНА

В России и странах мирового сообщества существует проблема обращения с облученным графитом активных зон уран-графитовых реакторов после выведения их из эксплуатации. Общее количество накопленного во всем мире облученного графита составляет около 250 тыс. т.

Сжигание является альтернативным решением вопроса обращения с радиоактивным графитом активных зон уран-графитовых реакторов АЭС и промышленных реакторов. Предлагаются разные способы сжигания графита: традиционное; в кипящем слое; с помощью плазмохимического реактора; газификация перегретым водяным паром (пиролиз); в расплаве карбонатов щелочных металлов в присутствии окислителя; в расплаве одного из карбонатов щелочных металлов или их смесей в присутствии оксида свинца[1].

В данной работе исследуются теплофизические характеристики (V, S, I, Z) системы радиоактивный графит – CuO-Na₂CO₃-K₂CO₃-NaCl-KCl.

Расчеты проводились методом термодинамического моделирования с помощью программы TERRA при начальном давлении – одна атмосфера, при начальной температуре 373 К и конечной температуре 3273 К.

В интервале температур от 373 до 1173 К удельный объем системы увеличивается от 0,52 до 1,74 м³/кг. При температуре 1173 К наблюдается точка перегиба и в интервале температур от 1173 до 1573К удельный объем увеличивается от 1,74 до 2,86 м³/кг. При температуре 1573 К прослеживается точка перегиба и в интервале температур от 1573 до 2373 К удельный объем увеличивается от 2,86 до 4,72 м³/кг. В точке 2373 К наблюдается перегиб и в интервале температур от 2373 до 3273 К удельный объем увеличивается от 4,72 до 6,76 м³/кг.

В области температур от 373 до 1173 К энтропия увеличивается от 3,1 до 4,17 кДж/(кг·моль). При температуре 1173 К прослеживается точка перегиба и при температуре от 1173 до 1573 К энтропия увеличивается от 4,17 до 4,93 кДж/(кг·моль). В точке 1573 К наблюдается перегиб и в интервале температур от 1573 до 2373 К энтропия увеличивается от 4,93 до 5,46 кДж/(кг·моль). При температуре 2373 К прослеживается перегиб и на участке температур от 2373 до 3273 К энтропия увеличивается от 5,46 до 5,81 кДж/(кг·моль).

* Н.М. Барбин, nmbabin@mail.ru

При температуре от 373 до 1173 К полная энтальпия увеличивается от -1846,03 до -1016,83 кДж/кг. При температуре 1173 К наблюдается точка перегиба и на участке температур от 1173 до 1573 К полная энтальпия увеличивается от -1016,83 до 5,3 кДж/кг. При температуре 1573 К прослеживается точка перегиба и в интервале температур от 1573 до 2373 К полная энтальпия увеличивается от -5,3 до 1119,19 кДж/кг. При температуре 2373 К наблюдается точка перегиба и полная энтальпия увеличивается от 1119,19 до 2119,32 кДж/кг.

В области температур от 373 до 1173 К массовая доля конденсированной фазы уменьшается от 0,33 до 0,3. В точке 1173 К наблюдается перегиб и в области температур от 1173 до 1573 К массовая доля конденсированной фазы уменьшается от 0,3 до 0,12. В точке 1573 К наблюдается перегиб и в области температур от 1573 до 2373 К массовая доля конденсированной фазы уменьшается от 0,12 до нуля.

Выделены 4 интервала температур в которых происходят изменения термодинамических характеристик системы.

1 температурный интервал от 373 до 1173 К: изменения термодинамических характеристик системы связаны с уменьшением содержания газа CO_2 .

2 температурный интервал от 1173 до 1573 К: изменения термодинамических характеристик системы связаны с увеличением содержания газа CO_2 и со сгоранием конденсированного С.

3 температурный интервал от 1573 до 2373 К изменения термодинамических характеристик носят линейный характер и определяются парогазовой фазой.

4 температурный интервал > 2373 К: изменения термодинамических характеристик системы связаны с термическим разложением парогазовой фазы.

Основной вклад в термодинамические характеристики системы вносит конденсированный С до температуры его сгорания (1273 К). При температуре > 1273 К термодинамические характеристики системы определяются парогазовой фазой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганов А.А., Хвостов В.И., Комаров Е.А. и др. Проблемы утилизации реакторного графита остановленных промышленных уран-графитовых реакторов // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т.310. №2. С.94-98.

N.M. Barbin^{1,2}, A.M. Kobelev¹, D.I. Terent'ev¹, S.G. Alekseev¹

¹Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia,

²Ural State Agrarian University

THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM RADIOACTIVE GRAPHITE-CuO-Na₂CO₃-K₂CO₃-NaCl-KCl IN THE ARGON ATMOSPHERE

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОНОНОВ С ГРАНИЦАМИ ОБРАЗЦА

Современные технологии разработки и производства полупроводниковых структур базируются на элементах микро- и наномасштаба. При этом функционирование электронных компонентов в расчетных режимах невозможно без поддержания требуемого теплового режима, так как накладываются жесткие ограничения на диапазон рабочих температур [1]. В отличие от макроскопических тел, для которых применимы классические законы теплопереноса, в структурах микро и наномасштаба необходимо привлекать совершенно иные методы, основанные на статистике квазичастиц, фононов – квантов колебаний решетки – с учетом так называемого размерного эффекта [2].

За последние десятилетия наблюдается все возрастающий рост интереса к задаче моделирования процессов теплопереноса (в том числе расчета эффективной теплопроводности) в структурах, в которых длина свободного пробега фононов, l_{∞} , сопоставима или во много меньше характерного размера образца, $l_{хар}$. Для анализа процессов переноса вводится безразмерный параметр – число Кнудсена, $Kn = l_{\infty} / l_{хар}$. Так в структурах, построенных на элементах микро- и наномасштаба, выделяют два режима теплопереноса:

1. баллистический режим, $Kn \gg 1$, когда фононы почти не взаимодействуют друг с другом, свободно распространяются внутри структуры и рассеиваются на границе образца (на интерфейсе в случае сверхрешеток);

2. диффузионно-баллистический, $Kn \sim 1$, когда часть фононов участвует в баллистическом переносе, а часть в диффузионном, соответствующем классическому закону теплопроводности в макроскопическом образце.

Общей чертой данных режимов является то, что процессы взаимодействия фононов с границей образца начинают играть *определяющую роль* в теплопроводности, в отличие от диффузионного режима, где основными являются именно процессы взаимодействия фононов друг с другом [3]. Однако, метод расчета, обладающий достаточной предсказательной силой и позволяющий выявлять факторы, воздействуя на которые, можно было бы эффективно управлять тепловым режимом, до сих пор не найден [4].

Целью данной работы является 1) формулирование общего подхода к проведению комплексного анализа процессов распространения тела в структурах микро- и наномасштаба; 2) разработка алгоритмов для проведения моделирования процессов взаимодействия фононов с границей образца;

^(*) В.И. Хвесюк, khvesyuk@bmstu.ru

3) проведение расчетов и выявление факторов, влияющих на процесс переноса тепла в баллистическом и диффузионно-баллистическом режимах.

Анализ работ по взаимодействию фононов с границей образца показал, что до сих пор в расчетах наиболее распространен подход Казимира-Займана [5], согласно которому в качестве длины свободного пробега между последовательными взаимодействиями фононов со стенками принимается характерный размер образца с учетом поправочного множителя, который учитывает лишь вероятность зеркального/диффузного отражения от границы. Данная модель содержит ряд упрощений и не учитывает следующие факторы: 1) качественные отличия в режимах теплопереноса для фононов разной поляризации, энергии и температуры, определяемых числом Кнудсена, Kn ; 2) распространение фононов под разными углами к поверхности; 3) процессы распада исходного фонона на два (теория трехчастичного взаимодействия).

На основе проведенного анализа и применения прямого Монте-Карло моделирования диффузии фононов [6] проведен расчет процессов взаимодействия фононов с границами образца в диффузионно-баллистическом и баллистическом режимах теплопереноса. Полученные результаты качественно и количественно отличаются от известного соотношения [5] и его аналогов, позволяют более строго подойти к описанию взаимодействия фононов, и исключить необходимость в подгоночных параметрах, присущих моделям [5].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект 16.8107.2017 / 6.7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pop E., Goodson K.E. Thermal Phenomena in Nanoscale Transistors // J. Electron. Packag. 2006. Vol. 128. № 2. P. 102-108.
2. Khvesyuk V.I., Skryabin A.S. Heat Conduction in Nanostructures // High Temp. 2017. V. 55. № 3. P. 428–450.
3. Khvesyuk V.I., Barinov A.A. Hierarchy of models for calculating the thermal conductivity in nanostructures // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012352.
4. Оценка вкладов различных механизмов взаимодействий фононов в диффузионно-баллистических режимах / А.А. Баринов, Б. Лю, К. Чжан // Труды РНТК-7: в 3 томах (22—26 октября 2018 г., Москва). Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ. 2018. С. 209-212.
5. Berman R., Foster E.L., Ziman J.M. Thermal conduction in artificial sapphire crystals at low temperatures // Proceedings of the Royal Society of London A. 1955. V. 231. P. 130-144.
6. Диффузия фононов / В.И. Хвесьюк, В. Цяо, А.А. Баринов // Труды РНТК-7: в 3 томах (22—26 октября 2018 г., Москва). Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ. 2018. С. 293-296.

A.A. Barinov, V.I. Khvesyuk
Bauman Moscow State Technical University

MODELING THE PROCESSES OF PHONON INTERACTION WITH THE BOUNDARIES OF THE SAMPLE

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ИМИТАТОРОВ РАСПЛАВА СОЛЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Сегодня перед современной энергетикой стоит ряд вопросов, одним из которых является поиск альтернативных решений в области проектирования энергетических установок. Основными требованиями к такого рода проектам служат: снятие ограничений по топливным ресурсам, экологическая безопасность, исключение тяжелых аварий и экономическая конкурентоспособность. В настоящий момент разрабатываются различные проекты решений этих проблем, среди которых можно выделить ряд перспективных термоядерных и гибридных проектов. Возможной рабочей средой которых выступают расплавы солей [1]. Однако, на пути реализации этих проектов стоит ряд технических проблем, среди которых существуют вопросы взаимодействия расплавленной соли с магнитным полем, особенности её гидродинамики и теплообмена. Работа в этой области ведётся коллективом авторов НИУ МЭИ - ОИВТ РАН. Исследования проводятся путем численного моделирования [2] и экспериментов с использованием модельных теплоносителей на установке «Солевой контур РК-3». В качестве модельной жидкости использовался 30%-ный раствор КОН. В ходе экспериментальной сессии была изучена конфигурация опускного течения имитатора расплава солей в круглой трубе в условиях действия поперечного магнитного поля и однородного обогрева. Получение данных непосредственно изнутри потока стало возможным благодаря уникальной технологии микротермопарных погружных зондов. С помощью шарнирного зонда выполнялось измерение температурного поля исследуемого сечения, и на основании данных о температуре и режимных параметрах рассчитываются безразмерные локальные и затем средние по периметру коэффициенты теплоотдачи (КТО) и числа Нуссельта. Безразмерные критерии, характеризующие режим течения, определялись по аналогии с подходом, предложенным в [3]. Изменения в структуре потока под влиянием магнитного поля изучались при помощи анализа интенсивности температурных пульсаций (σ), нормировка которых проводилась на динамическую температуру (t^*), по методике из [4].

Была проведена серия экспериментов в переходных режимах течения в вертикальном и горизонтальном положениях трубы при малых числах Рейнольдса ($Re=3000-5000$) и в области развитой турбулентности ($Re=14000$)

(*) И.А. Беляев, bia@ihed.ras.ru

под влиянием сильного поперечного магнитного поля ($Ha=17$) и однородного обогрева.

При больших числах Рейнольдса ($Re=14000$) температурные пульсации подавляются магнитным полем. Однако, в области переходных режимов, при числах Рейнольдса ($Re=7000$) (рис. 1), наблюдается частичное подавление температурных пульсаций магнитным полем. Кроме того, интересная картина течения была обнаружена вблизи ламинарно-турбулентного перехода ($Re=4000-7000$), которая выражалась в появлении периодических пиков температурных пульсаций, частично подавляемых действием магнитного поля.

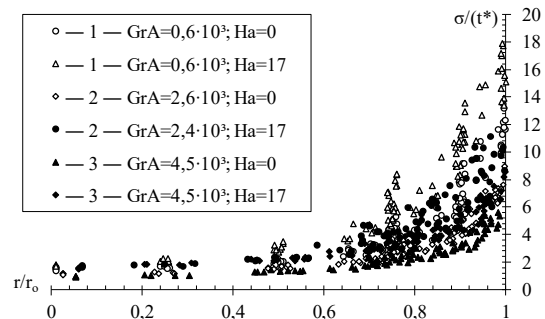


Рис. 1. Распределение безразмерной интенсивности пульсаций температуры, $Re = 7 \cdot 10^3$

Также в ходе работы экспериментально исследована специфика взаимодействия электромагнитной силы и сил плавучести при МГД-теплообмене расплава соли, которая может проявляться в образовании точек локального перегрева или квазистационарных режимов течения, сопровождающихся низкочастотными пульсациями температуры и скорости.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 17-19-01745. Эксперименты проведены на УНУ «Ртутный стенд».

ЛИТЕРАТУРА

1. Велихов А.П. и др. Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза — стратегический ориентир развития отрасли// ВАНТ.ТС. 2017. Т. 40. №. 4.
2. A. V. Kotlyar, et al. Turbulent MHD heat transfer in liquids with the Prandtl number $Pr > 1$ // Magnetohydrodynamics. 2017. Т. 53. №3
3. Belyaev I. A., Zakharova O. D., Krasnoshchekova T. E., Sviridov V. G., Sukomel L. A. // Thermal Engineering. 2016. Т. 63. №. 3. С. 214-221
4. Petukhov B. S., Polyakov A. F., Launder B. E. // Heat transfer in turbulent mixed convection. 1988.

I A Belyaev¹, D.A. Biryukov¹, E A Belavina¹,
Ya I Listratov^{1,2}, A V Kotlyar² and V G Sviridov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS,

²Moscow Power Engineering Institute

HEAT TRANSFER IN MIXED CONVECTION OF MOLTEN SALT IN THE PRESENCE OF MAGNETIC FIELD

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ R125
В КРУГЛОМ КАНАЛЕ ДИАМЕТРОМ 0.95 ММ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ**

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена в вынужденном потоке кипящего фреона R125 в канале малого диаметра при высоких приведенных давлениях. В высокоэффективной энергосберегающей энергетике в качестве рабочего вещества предлагается использование различных хладонов и CO₂ в сжиженном состоянии. Использование подобных веществ, помимо знания термодинамических свойств, предполагает наличие методов расчета теплообмена при кипении и гидродинамического сопротивления двухфазного потока.

Для экспериментального обоснования расчетных методов нужны надежные опытные данные. Кроме того, в современной технике востребованы миниатюрные высокоэффективные теплообменные устройства с охлаждающими мини и микроканалами, в которых в качестве теплоносителя могут использоваться различные фреоны. Для проектирования подобных систем необходимы надежные экспериментальные данные и апробированные методики расчета теплообмена.

Целью работы является получение систематизированного набора экспериментальных данных, на основании которого можно будут апробированы методики расчета гидродинамики и теплообмена при течении кипящей жидкости в миниканале в условиях высоких приведенных давлений.

В докладе представлено описание экспериментального стенда (Рис. 1), показаны опытные данные о теплоотдаче и гидродинамике, а также их обобщение. На стенде выполняются экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при вынужденном течении фреона R125 в вертикальном канале диаметром 0.95 мм, длиной 100 мм. Гидравлический контур стенда позволяет поддерживать стабильные параметры потока на входе рабочего участка при давлениях до 2.5 МПа. Измеряемыми параметрами при проведении эксперимента являлись: массовый расход теплоносителя, давление и температура на входе и выходе рабочего участка, электрическая мощность нагрева, температура стенки в пяти сечениях по длине рабочего участка. Измерения выполнялись с помощью автоматизированной системы сбора данных.

^(*) А.В. Беляев, belyaevalek@yandex.ru

Эксперименты проведены при следующих параметрах потока. Отношение давления на входе рабочего участка к критическому давлению составляло $p/p_{кр} \cong 0.4 \div 0.5$. Измерения проводились при расходе ≈ 1 г/с, соответствующему массовой скорости ≈ 1500 кг/(м²с), в широком диапазоне значений относительной энтальпии потока на входе рабочего участка, соответствующей недогретой и насыщенной жидкости. На каждом режиме с фиксированными параметрами подводилась максимально возможная мощность, значение которой определялось наступлением кризиса теплообмена при кипении.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 19-19-00410.

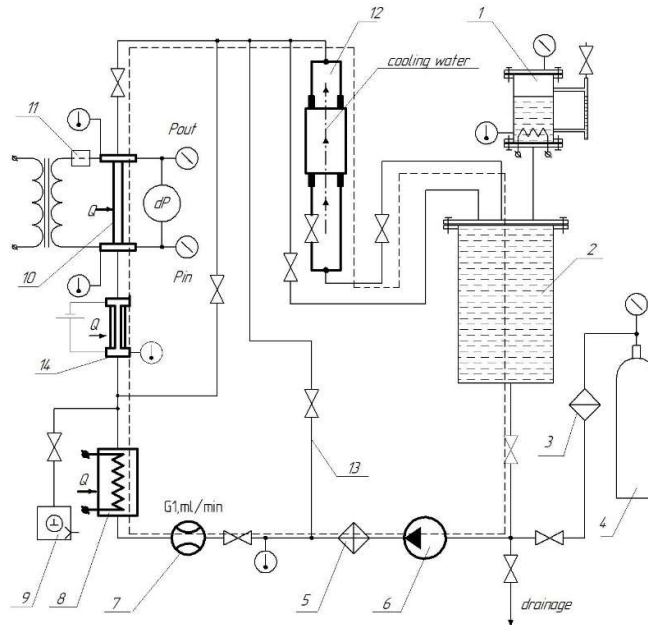


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 – термокомпрессор; 2 – бак; 3, 5 – фильтры; 4 – баллон с фреоном; 6 – циркуляционный насос с магнитной муфтой; 7 – расходомер; 8, 14 – предварительные нагреватели; 9 – форвакуумный насос; 10 – рабочий участок; 11 – датчик тока; 12 – теплообменник; 13 – байпасная линия.

A.V. Belyaev, A.V. Dedov, A.I. Zanosko
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS
AND HEAT TRANSFER OF FLOW BOILING OF R125 IN A ROUND
CHANNEL WITH A DIAMETER OF 0.95 mm
IN CONDITIONS OF HIGH REDUCED PRESSURE**

МГД-ТЕПЛООБМЕН ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ОБОГРЕВА

Предполагаемые МГД-конфигурации, близкие к условиям реактора ТОКАМАК, исследуются с использованием ртути в качестве модельной жидкости в рамках совместной исследовательской программы ОИВТ РАН – НИУ МЭИ [1]. Получаемые экспериментально данные включают в себя усредненные по времени температурные поля, распределение локальных температур стенки и статистических характеристик пульсаций температуры в потоке. Получение таких данных стало возможным благодаря технологии микротермопарных погружных зондов. В данной работе измерения проводились в потоке ртути, под воздействием поперечного магнитного поля.

Из предыдущих исследований известно, что совместное влияние сильного поперечного магнитного поля и сил плавучести проявляется в виде крупномасштабных вторичных течений, сопровождающихся пульсациями температуры аномально большой амплитуды [2-4]. Однако, существующие экспериментальные возможности не позволяли ответить, будет ли это явление существовать в более сильных магнитных полях.

Исследование проводилось в конфигурации - опускное течение ртути под действием поперечного магнитного поля и неоднородного обогрева, ранее эта конфигурация была изучена в [5] с использованием контура РК-2. Схема данной конфигурации течения и различия в экспериментальных условиях показаны на рис. 1. Экспериментальный стенд РК-3 (HELMEF) входит в состав уникального научного комплекса УНУ «Ртутный МГД-стенд», объединяющего три разные установки РК-1, РК-2, РК 3 с едиными методиками, зондами и командой.

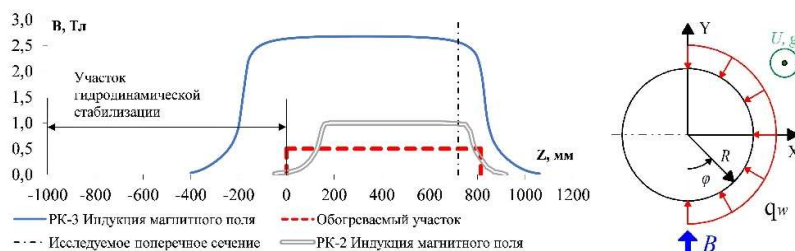


Рис. 1. Исследуемая конфигурация

Измерение температуры проводилось по точкам в поперечном сечении трубы, а для разных режимов были построены графики распределения абсолютных значений и интенсивности пульсаций температуры, как под влиянием магнитного поля различной величины, так и без него. Изученное

(*) П.А. Сардов, gall123@yandex.ru

поперечное сечение расположено в точке $z/d=37,4$ от начала зоны обогрева. Расход и плотность теплового потока фиксировались при значениях, обеспечивающих $Re=10000$, $Gr=6 \cdot 10^7$ для изучения влияния магнитного поля, реализующего $Ha=0-1350$.

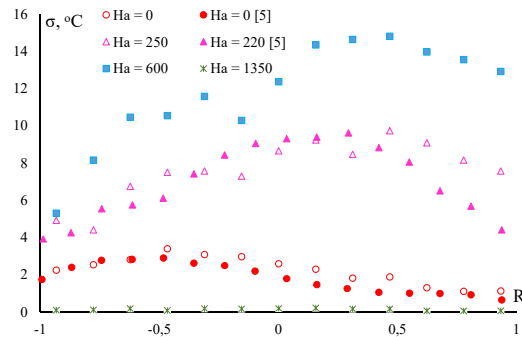


Рис. 2. Распределение интенсивности пульсаций температуры по безразмерному радиусу трубы. $Re=10000$, $Gr=6 \cdot 10^7$

Наложение магнитного поля приводит к существенным изменениям в структуре потока, в том числе и смещению максимума интенсивности пульсаций температуры в сторону необогреваемой стенки. Поле интенсивности температурных пульсаций в режимах с неоднородным обогревом, сначала медленно развивается, а затем изменяется скачкообразно с изменением своей формы. Очевидно, что структура потока существенно меняется и развиваются вторичные течения термогравитационного происхождения. С дальнейшим ростом числа Гартмана (при $Re=10000$, $Gr=6 \cdot 10^7$, $Ha>800$) было обнаружено полное подавление пульсаций температуры в любой точке экспериментального сечения. Необходимо отметить, что односторонний обогрев является предельным случаем неоднородного и, первым приближением к наиболее близким условиям контуров охлаждения первой стенки термоядерного реактора. Данные экспериментов сравниваются с предыдущими результатами [5].

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ №14.Z50.31.0042.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батенин В. М. и др. // ТВТ. 2015. Т. 53. С. 904-907
2. Belyaev I.A. et al. // Magnetohydrodynamics. 2013. №49
3. Melnikov I.A. et al. // Fusion Engineering and Design. 2016. №112. С. 505-512
4. Kirillov I.R. et al. // Fusion Engineering and Design. 2016. №104. С. 1-8.
5. Мельников И.А. Исследование гидродинамики и теплообмена МГД-течений в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле. Москва, 2014.

I.A. Belyaev¹, N.Yu. Pyatnitskaya¹, P.A. Sardov¹ and V.G. Sviridov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS,

²Moscow Power Engineering Institute

MHD HEATTRANSFER UNDER MIXED CONVECTION OF LIQUID METAL IN A NONUNIFORM HEATING

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ХРАНЕНИИ ЗЕРНА В СИЛОСНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Исследование процессов внутреннего тепло и влагообмена в металлических силосах при хранении зерновых структур в плотном слое необходимо для совершенствования режимных параметров и сохранения качества продукции. Основной задачей организации процесса хранения является определение режимов периодической продувки слоя для поддержания требуемой температуры зерна и предотвращения конденсации влаги, которая может появляться на внутренних поверхностях стенок и крыши металлической конструкции силоса.

Разработанная математическая модель позволяет определить параметры кинетики тепломассообменного процесса сушки, влияющие на выбор параметров воздуха при активном вентилировании. Определены температуры воздуха на выходе из зернового слоя и температуры зерна после охлаждения. Описаны процессы, происходящие в потоке воздуха и в зерновой массе во время активного вентилирования при изменении влажности зерна. Выявлено и проиллюстрировано уменьшение влагосодержания зерна по высоте слоя за счет процесса массоотдачи влаги с поверхности зерна в окружающую среду. Показано влияние различных факторов на время прогрева слоя: скорости воздуха, начальной температуры воздуха, геометрических характеристик зерновки различных культур, высоты зернохранилища. Общая продолжительность осушки и охлаждения верхнего слоя зерна до начальных параметров воздуха слабо зависит от начальных параметров воздуха (температуры и влагосодержания). Определено существенное влияние скорости воздуха на длительность процесса охлаждения и осушки. Результаты моделирования соответствуют экспериментальным значениям температуры зерна при хранении. Полученная математическая модель позволяет проводить расчеты кинетики сушки для различных условий хранения и различных видов зерна.

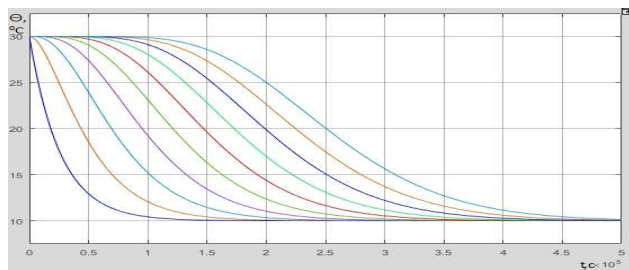


Рис. 1. Изменение температуры зерна Θ [°C] по высоте металлического силоса

^{*)} Т.С. Березина, berezinatats@gmail.com

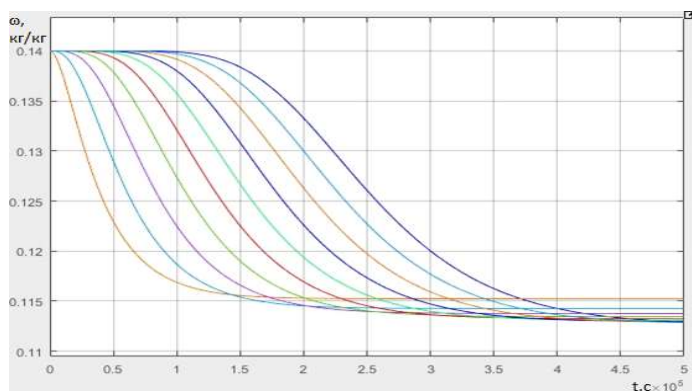


Рис. 2. Изменение влажности зерна ω [кгвлаги/кгсух.зерна] по высоте металлического силоса

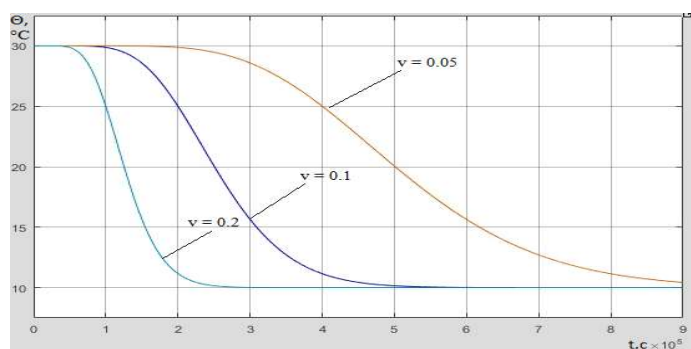


Рис. 3. Изменение температуры зерна Θ [°C] в последнем слое зерна при скоростях воздуха $v = 0.05, 0.1, 0.2$ м/с

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудобашта С.П. Теплотехника. изд. 2-е, дополненное. Под ред. С.П. Рудобашта. М., Изд. «Перо», 2015. — 672 с.
2. Ванцкул А. С., Горячева Е. М., Гаряев А. Б., Сорочинский В. Ф. Исследование влияния различных факторов на время охлаждения слоя зерна в металлических силосах. //Сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ – 2017» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения (11-12 октября 2017 года). Т. 7 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С. 1805-1810.

T.S. Berezina, G.P. Vlasenko
National research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia

GRAIN ACTIVE VENTILATION MODELLING PROCESS IN THE SILOS

КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА ДЛЯ НУЖД МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

В Красноярском крае тариф на электроэнергию для населения в пределах социальной нормы составляет около 2,5 руб./кВт*ч, сверх социальной нормы электропотребления около 4,0 руб./кВт*ч. Тариф на электроэнергию от ДЭС составляет 25 - 45 руб./кВт*ч. Тариф на тепловую энергию вырабатываемую ТЭЦ и ГРЭС составляет около 1600 руб./Гкал, тариф от котельных составляет 3000 – 24000 руб./Гкал [1,2].

Для решения проблемы энергоснабжения децентрализованных районов Красноярского края, где электроэнергия вырабатывается на ДЭС, а тепловая энергия на котельных, на кафедре «Тепловых электрических станций» политехнического института Сибирского федерального университета совместно с НПО «Инверсия» г. Екатеринбург была проведена работа по созданию пилотной (опытной) когенерационной энергетической установки на основе газификации твердого органического топлива (Рис. 1).

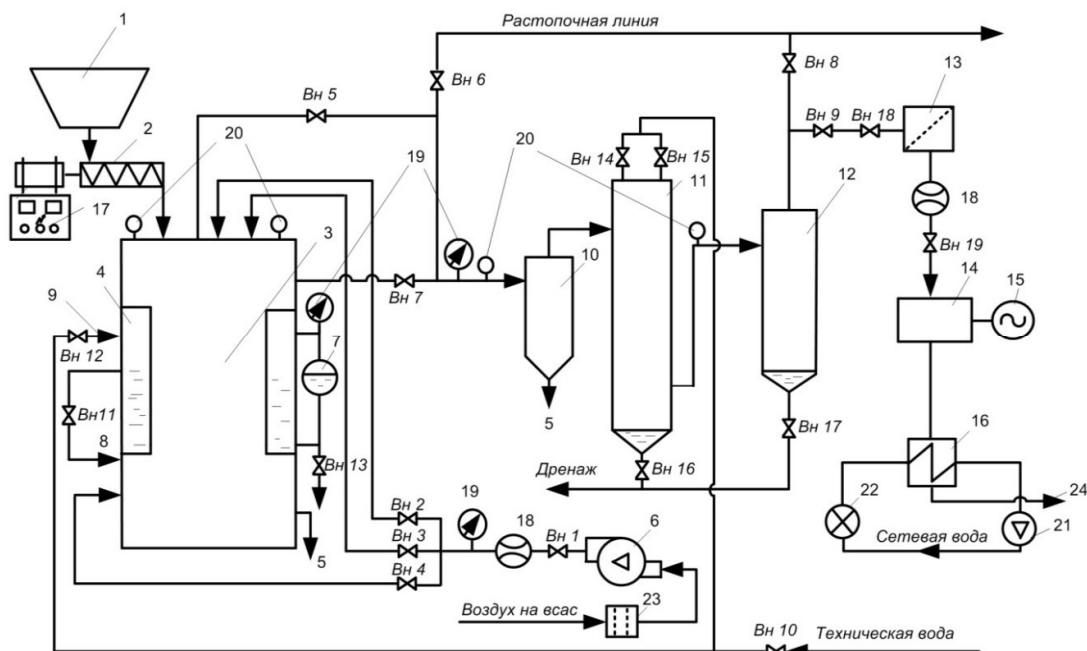


Рис. 1. Принципиальная схема когенерационной энергетической установки с газификацией твердого органического топлива

^(*) Е.А.Бойко, eboiko@sfu-kras.ru

Таблица 1. Удельные характеристики когенерационной установки

Наименование параметра	Пилотная (опытная) установка, (экспериментальные значения)	Перспективная установка промышленного образца (расчетные значения)
Удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии, г.у.т./кВт*ч	976	332
Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии, кг.у.т./ГДж	39	17
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт*ч	7	5
Себестоимость тепловой энергии, руб./Гкал	2500	2000
Общий эксергетический КПД, %	12	34

Потребность в техническом перевооружении установленных ДЭС и котельных по Красноярскому краю такая, что промышленными установками, безусловно, должны быть замещены около 100 МВт дизельной генерации из-за снижения себестоимости производства электрической энергии в 10 раз и замещены котельные установки суммарной тепловой мощностью 3850 Гкал/ч по отдельным технико-экономическим расчетам в связи с более высокой себестоимостью кВт*ч и низкой себестоимостью Гкал*ч[3]. Учитывая, что ситуация с энергоснабжением других регионов РФ примерно одинаковая, опыт внедрения установок промышленного образца для замещения установленных ДЭС и котельных Красноярского края может быть интересен другим регионам РФ, а также другим странам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко Е.А., Бобров А.В., Шишмарев П.В., Янов С.Р. Состояние и направления развития топливно-энергетического комплекса Красноярского края: монография // Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – 456 с.
2. <http://zakon.krskstate.ru>.
3. Николаев Ю.Е., Дубинин А.Б., Вдовенко И.А., Сирдюков С.В. Развитие теплофикации в схемах теплоснабжения малых городов. // Промышленная энергетика. – 2013. - №7 – с. 2-4.

E.A. Boiko, A.V. Strashnikov
Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk

COGENERATION POWER PLANT BASED ON GASIFICATION OF SOLID FOSSIL FUELS FOR THE NEEDS OF SMALL DISTRIBUTED ENERGY OF THE KRASNOYARSK REGION

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ
МАТЕРИАЛ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ, В УСЛОВИЯХ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК**

Тепловые процессы, происходящие в материалах с фазовыми переходами, представляют значительный интерес в современных энергоэффективных технологиях. В радиаторных системах такие материалы позволяют увеличить теплоемкость системы и снизить риск тепловой перегрузки. Энергия фазового перехода поглощается и выделяется в небольшом диапазоне температур. Наиболее подходящими материалами для использования в строительстве или радиоэлектронной аппаратуре представляются парафины, важными свойствами которых являются высокая скрытая энергия плавления, невысокие температуры фазового перехода, химическая стабильность. При периодических нагрузках высоких мощностей требуются системы охлаждения с высокой эффективной теплоемкостью. Металлические радиаторы с включениями парафинов позволяют интенсифицировать теплоотведение при достижении температуры плавления. Поглощение большого количества энергии при фазовом переходе позволяет существенно снизить рабочие температуры и увеличить время работы устройства [1, 2].

Настоящее исследование посвящено численному моделированию процессов плавления парафина внутри замкнутой радиаторной системы, нагреваемой от источника нестационарного объемного тепловыделения. Влияние частоты изменения объемного тепловыделения источника на среднюю температуру внутри тепловыделяющего элемента и процессы теплопереноса в системе были проанализированы с использованием методов математического моделирования.

Расчетная область представляет собой прямоугольную полость, заполненную парафином (n-октадекан $C_{18}H_{38}$), внутри которой локализован источник энергии с расположенным над ним медным радиатором с пятью поперечными ребрами. Начальная температура всей области была равна температуре окружающей среды, на верхней и боковых стенках соблюдалось условие конвективного охлаждения. В расплаве рассматривался ламинарный конвективный теплоперенос, удовлетворяющий критерию Буссинеска. Теплофизические характеристики материалов в пределах одной фазы считались постоянными. Математическая модель была сформулирована в преобразованных безразмерных переменных «функция тока – завихренность –

^(*) М.А. Шеремет, Michael-sher@yandex.ru

температура», уравнения гидродинамики решались в области, занимаемой расплавом. Переход из одного фазового состояния в другое в уравнении энергии был учтен путем введения области сглаженного перехода теплофизических параметров и энтальпии с использованием вспомогательной функции [2].

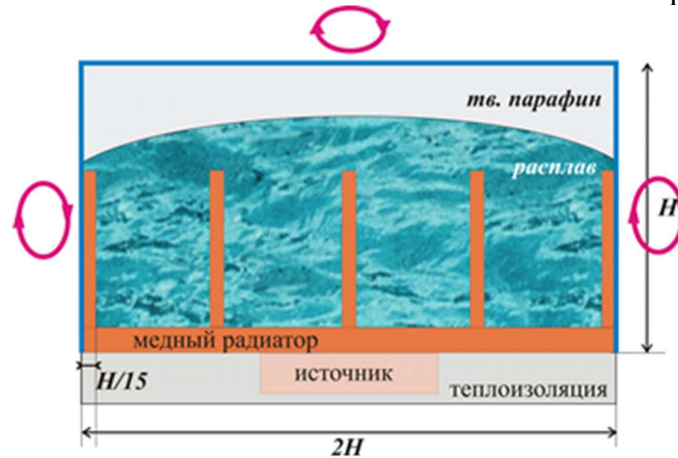


Рис. 1. Расчетная область

Следует отметить, что объемное тепловыделение источника энергии описывалось нестационарной функцией, отражающей переменный характер тепловой нагрузки этого элемента. Локальные и интегральные характеристики теплопереноса были получены для разных чисел Остроградского в широком диапазоне изменения частоты колебаний объемного тепловыделения. При увеличении частоты колебаний снижается амплитуда температурных изменений внутри источника, вместе с тем следует учитывать инерционность всей системы охлаждения и среднюю мощность нагревающего элемента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых (грант МК-1934.2019.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Maghalseh M.A., Mahkamov K. Methods of heat transfer intensification in PCM thermal storage systems: Review paper // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 92. P. 62–94.
2. Bondareva N.S., Sheremet M.A. Conjugate heat transfer in the PCM-based heat storage system with finned copper profile: Application in electronics cooling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 124. P. 1275–1284.

N.S. Bondareva, M.A. Sheremet
Tomsk State University

HEAT TRANSFER FEATURES IN A PCM-BASED SYSTEM UNDER THE TIME-DEPENDENT THERMAL LOAD

УДК 533.697:629.7:621.37

А.С. Борейшо¹, М.Ю. Вовк³, А.Д. Едигарев⁴, И.А. Киселев¹,
В.В. Кулалаев³, А.В. Морозов¹, А.Е. Орлов^{2, (*)}, П.Г. Смирнов¹
¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург,
²АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург,
³ПАО «ОДК-УМПО», филиал ОКБ им. А.Люльки, Москва,
⁴АО «ОДК-Климов», Санкт-Петербург

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ СО₂-ЛАЗЕР НА ГОРЕНИИ НА БАЗЕ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Газодинамические СО₂ лазеры на горении были разработаны и исследованы в 60-70 гг. прошлого столетия. На них были достигнуты высокие энергетические показатели. Преобразование накопленной энергии активной среды в лазерное излучение происходило в результате экзотермических реакций горения углеводородных горючих с кислородсодержащими окислителями и разгона полученных продуктов сгорания до сверхзвуковых скоростей с помощью сопловых блоков без дополнительного подвода энергии.

По своей сути, ГДЛ – это тепловая машина, такая же, как авиационный двигатель. Оба устройства для своей работы используют продукты сгорания углеводородного горючего со сжатым воздухом.

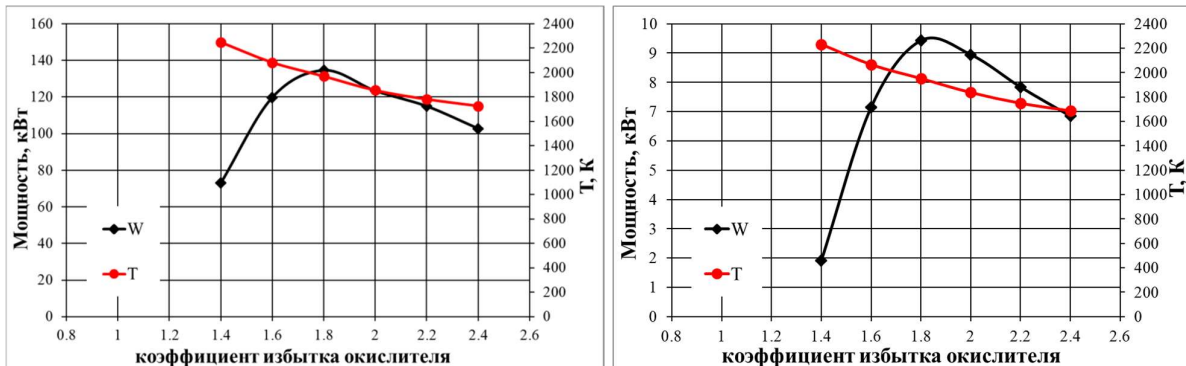
Применение СО₂-ГДЛ на базе ГТД имеет ряд преимуществ. Основной по массе (более 95%) компонент для создания активной среды лазера – воздух берется из атмосферы и сжимается до необходимого уровня давления в компрессоре двигателя. Это позволяет существенно сократить систему хранения компонентов, поскольку возимый запас включает в себя только горючее, доля которого в общем расходе не превышает 5%.

Идеи совмещения ГДЛ с газотурбинными двигателями существовали уже давно. Имеются отечественные и зарубежные патенты на внедрение ГДЛ в авиационный двигатель (патенты US5384802, US4713823, US3899749, RU2516985 и др.) [1-5]. В конце 70-х годов в нашей стране под руководством академика О.Н. Фаворского был создан первый в мире наземный ГДЛ с отбором воздуха от авиационного двигателя Р-38-300 мощностью порядка 180 кВт, непрерывно работающий в течение длительного времени [6],

В статье рассмотрены и проанализированы варианты совмещения ГДЛ с авиационными газотурбинными двигателями. Определены выходные энергетические характеристики и основные параметры газодинамического лазера с отбором компонентов топлива для активной среды от самолетного двигателя АЛ-31Ф и вертолетного двигателя ВК-3000В (рис. 1).

(*) А.Е. Орлов, orlov@lsystems.ru

Рассмотрены вопросы повышения рабочей температуры активной среды и выходных энергетических характеристик лазера за счет применения современных сплавов и методов охлаждения лопаток соплового блока.



а) ГДЛ на базе двух самолетных двигателей АЛ-31Ф

б) ГДЛ на базе двух вертолетных двигателей ВК-3000В

Рис. 1. Выходная мощность CO₂-ГДЛ на базе ГТД

ЛИТЕРАТУРА

1. Laser apparatus, US Patent № US5384802, Jan. 24, 1995.
2. Pre-combustion integrated RAM airbreathing laser, US Patent №US4713823, Dec.15. 1987.
3. Gas dynamic lasers, US Patent № US3899749, Aug.12, 1975.
4. Способ работы авиационного газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления, патент на изобретение № RU2516985 РФ, 14.02.2013.
5. Способ работы авиационного газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления, патент на изобретение № RU2587509 РФ, 07.04.2015.
6. «В мире науки», 2017, №11, с.110-115.

A. Boreisho¹, M. Vovk³, A Edigarev⁴, I. Kiselev¹,
V.KulalaeV³, A. Morozov¹, A. Orlov², P. Smirnov¹
¹Baltic State Technical University «VOENMEH»
named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg,
²Laser Systems JSC, Saint-Petersburg,
³Branch of PJSC «UEC-UMPO», Experimental
design Bureau named after A. Lyulka, Moscow,
⁴JSC «UEC Klimov», Saint-Petersburg.

COMBUSTION-DRIVEN GAS-DYNAMIC CO₂-LASER ON THE BASIS OF MODERN AIRCRAFT ENGINES

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЯНОГО ПАРА

Вода и водяной пар получили широкое применение в промышленности в качестве рабочего тела и теплоносителя [1]. Для определения свойств водяного пара рассматривается и используется схема расчетов на основе кластерной модели [2]. Исследования с применением кластерного подхода развиваются в работах [3-5]. Для расчетов разработана программа для ЭВМ [6], которая базируется на вычислении кластеров любого размера.

Были решены уравнения и получены формулы для расчета термодинамических и теплофизических свойств вещества в газовой фазе с учетом кластерного состава [2, 3], в том числе для определения равновесной теплоемкости (формулы 1 и 2) с учетом кластерного состава при определенных макропараметрах:

- теплоемкость C_v газа при постоянном объеме:

$$C_v = \frac{R}{2} \cdot \frac{\sum_{g=1}^n C_g^{(c)} \cdot i_g}{\sum_{g=1}^n C_g^{(c)} \cdot \mu_g} \quad (1)$$

R – газовая постоянная,

g – размер кластеров в газе,

i_g – число степеней свободы кластера с размером g ,

$C_g^{(n)}$ - доля g -мерных кластеров по отношению к плотности молекул,

μ_g - молярная масса кластеров, содержащих g молекул.

- теплоемкость C_p при постоянном давлении:

$$C_p = C_v + \frac{R}{\left(\sum_{g=1}^n C_g^{(c)} \cdot \mu_g \right)} \quad (2)$$

При сравнении рассчитанных значений теплоемкостей со справочными из [7] было выявлено различие, которое обусловлено следующими причинами: теплоемкость, определяемая с учетом кластерного состава по формулам (1) и (2), представляет собой так называемую равновесную теплоемкость. Разница между рассчитанными по формулам кластерной модели газа величинами

(*) М.Т. Туменбаева, marjanym@mail.ru

теплофизических и термодинамических характеристик и их справочными значениями позволяет выявить вклад “квазиреактивной” составляющей этих термодинамических характеристик, которая связана с энергией распада и образования кластеров, т.е. с эволюцией кластерного состава. Таким образом, теплоемкость можно представить в виде суммы равновесной и “квазиреактивной” составляющих:

$$C_v = C_v(C^{(c)}) + \Delta C_v \quad (3)$$

$$C_p = C_p(C^{(c)}) + \Delta C_p \quad (4)$$

На основании (3) и (4) вклад “квазиреактивной” составляющей теплоемкостей с учетом кластерного состава и его эволюции можно оценить, как:

$$\Delta C_v = C_{vспр} - C_{vрасч} \quad (5)$$

$$\Delta C_p = C_{pспр} - C_{pрасч} \quad (6)$$

Интерес представляет изучение и описание “квазиреактивной” составляющей термодинамических и теплофизических свойств на основе кластерной модели, а также доработка программы для ЭВМ, которую можно будет в дальнейшем применять для прогнозирования свойств веществ в газовой фазе в широких интервалах макропараметров, проектирования теплоэнергетического оборудования и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев В.Н. и др.//Теплофизические свойства технически важных газов: Справочник/ М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.
2. Курлапов Л.И. Кластерная модель газа // ЖТФ. - 2003. - Т. 73, вып. 2. - С. 51 - 55.
3. Быков Н.Ю., Горбачев Ю. Е., Прямое статистическое моделирование процессов формирования кластеров в газовой фазе: классический подход с поправкой на размер кластера, ТВТ, 2015, том 53, выпуск 2, 291–300;
4. Vykov N. Yu. Formation of Small Clusters in the Free Expanding Water Vapor Plume // Int. Fluid Dynamics, 2018, Vol. 53, No. 3, pp. 428–437.
5. Vykov N.Y., Yu.E. Gorbachevb Cluster formation in copper vapor jet expanding into vacuum: the direct simulation Monte Carlo //Int. Elsevier Ltd., Vacuum 163 (2019) 119-127.
6. Сегеда Т.А., Туменбаева М.Т. и др. Авторское свидетельство программа для ЭВМ: Расчет теплофизических и термодинамических свойств веществ в газообразном состоянии с учетом молекулярно-кластерного состава», г.Усть-Каменогорск, 2018 г;
7. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойств воды и водяного пара. Электронный справочник - www.tablicy-vody-vodyanogo-para-excel.ru.

N.G. Borissova¹, I.K. Iliev², T.A. Segeda³, M.T. Tumenbayeva¹
¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications,
²“Angel Kanchev” University of Ruse,
³D.Serikbayev East Kazakhstan state technical university

STUDY OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WATER VAPOR

ИНЖЕКЦИЯ ЖИДКИХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КРИОГЕННЫХ СТРУЙ В ВАКУУМ

Развитие ускорительной техники сделало возможным получение высокоэнергетичных пучков элементарных частиц. Взаимодействие таких пучков с криогенными монодисперсными мишенями позволит решить ряд фундаментальные проблемы ядерной физики.

В общем виде криогенные монодисперсные мишени представляют собой поток твёрдых монодисперсных гранул малых размеров, получаемых из предварительно сжиженного газа, с разбросом гранул по размерам и скорости, не превышающим 0,1%.

Подробное описание и принцип работы установок по получению криогенных корпускулярных мишеней приведено в работах [1,2].

Главным элементом установок является генератор монодисперсных капель. Из генератора струя жидкого криоагента инжектируется в вакуумную камеру и под действием специального возмущения распадается на одинаковые монодисперсные капли. Теоретической основой получения монодисперсных капель является теория Релея – Вебера [3]. Поскольку давление в вакуумной камере ниже давления тройной точки, капли охлаждаются, замерзают и становятся твёрдыми гранулами.

Для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких струй водорода и дейтерия была разработана модель истечения криогенной струи в область низкого давления. На базе разработанной модели, в программной среде PHOENICS численным методом получены зависимости изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия вдоль поверхности струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере установок по получению криогенных монодисперсных мишеней. В качестве примера, на рис.1 представлено изменение температуры внутренней части 10 мкм струи водорода при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с давлением 50 мбар.

Из полученных результатов следует, что при вводе тонких криогенных струй в среду с низким давлением они сразу не замерзают, а в течение некоторого времени остаются жидкими. Время полного замерзания существенным образом зависит от диаметра струи и скорости её истечения в рабочую камеру. В соответствии с расчётами при вводе в рабочую камеру тонких жидких струй водорода или дейтерия со скоростью до 100 м/с струи на расстоянии до 1 мм не

^(*) Е.В. Вишнеvский, emmanuelcell@mail.ru

успевают замёрзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счёт испарения охлаждаются и становятся гранулами.

Кроме того, из результатов численных расчётов следует, при одинаковых внешних параметрах замерзание струй дейтерия происходит за большее время, чем замерзание струй водорода. Полученный результат можно объяснить отличием теплофизических свойств водорода и дейтерия.

Разработанная модель, программа для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй и результаты численных расчётов могут быть использованы при создании установок по получению высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней.

Работа была поддержана грантом РФФИ 18-19-00615.

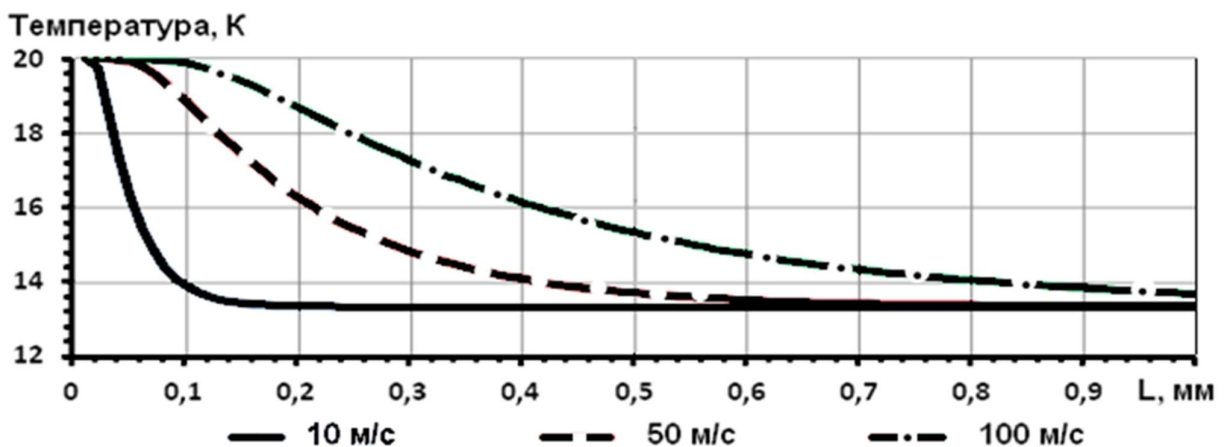


Рис. 1. Изменение температуры внутренней части 10 мкм струи водорода при разных скоростях истечения в рабочую камеру с давлением 50 мбар

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухаров А.В. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике / А.В.Бухаров, А.С.Дмитриев. – М.: МЭИ, 2013. – 144 с.
2. Boukharov A.V., Vasiliev A. N., Morozov D. A. et al. Search for New Forms of Matter in Antimatter–matter Interactions in the PANDA Experiment // Atomic Energy. 2012. V. 112. № 2. P. 129–138
3. Weber C. Zum Zerfalleines Flüssigkeitsstrahles (On the breakdown of a fluid jet) / C. Weber // Z. Angew. Math. und Mech. – 1931. –№ 11. – P. 136–154.

A.V. Boukharov, E.V. Vishnevskii, A.F. Ginevsky
National Research University «MPEI», Russia,

INJECTION OF LIQUID HIGH-SPEED CRYOGENIC JETS IN A VACUUM

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЫГОРАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО
ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ**

В последнее время потребность в ежегодном приросте объемов энергогенерации составляет 2–4 % [1], что достаточно существенно в рамках общемирового объема потребления энергии (около 100 ТВт·ч/год). Согласно программе «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года» в течение 5 лет на территории Российской Федерации запланировано ввести в эксплуатацию более 20 ГВт новых энергогенерирующих мощностей. Одним из перспективных направлений реализации этой программы является вовлечение возобновляемых и низкосортных источников энергии в топливно-энергетический комплекс [2–4] с целью обеспечения энергетической безопасности страны.

Одно из потенциальных решений проблемы связано с увеличением объемов использования в промышленной теплоэнергетике низкосортных и возобновляемых энергоресурсов: бурых углей, торфа, отходов углеобогащения, отходов деревообработки, биомассы. Но широкое применение этих энергоресурсов в рамках традиционных технологий сжигания в существующем котельном оборудовании невозможно из-за высокой влажности, относительно низкой теплоты сгорания, неоднородности состава, а из-за трудностей при транспортировке, хранении и подготовке топлива к сжиганию [5, 6]. В связи с этим перспективным направлением для практического приложения является изготовление композиционных топлив, в состав которых добавляются компоненты, повышающие энергетические характеристики горения и интенсифицирующие протекание процесса.

В рамках данной работы выполнено экспериментальное исследование закономерностей и характеристик физико-химических процессов при зажигании группы топливных композиций (на основе отходов углеобогащения, воды и отработанных масел) в условиях диспергирования при нагреве в высокотемпературной 700–1000 °С воздушной среде. С использованием программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации установлены основные характеристики зажигания (времена задержки), выгорания (длительность и завершенность процесса) и диспергирования (скорости движения фрагментов, расстояния их перемещения) топливных образцов. В условиях протекания последнего процесса инициирование горения топлива в относительно большом по размерам объеме (в 10–15 раз больше

^(*) Д.О. Глушков, dmitriyog@tpu.ru

начального размера образца топлива) способствует интенсификации процесса экзотермического реагирования и его устойчивости на начальном этапе горения.

Результаты экспериментального исследования являются основой для развития теоретических положений технологии зажигания перспективных гетерогенных топливных композиций (на основе мелкодисперсных твердых и жидких горючих компонентов), отличающейся от известных реализацией диспергирования топливных образцов в условиях интенсивного нагрева в воздушной среде с последующим кратным ростом поверхности химического реагирования, интенсифицирующим выгорание топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (проект ВИУ-ИШФВП-74/2019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Coal Information. International Energy Agency, 2017. <http://www.iea.org>.
2. Попель О.С., Реутов Б.Ф., Антропов А.П. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в централизованной и автономной энергетике // Теплоэнергетика, 2010. № 11. С. 2.
3. Osman A.I., Abdelkader A., Johnston C.R., Morgan K., Rooney D.W. Thermal investigation and kinetic modeling of lignocellulosic biomass combustion for energy production and other applications // Industrial and Engineering Chemistry Research, 2017. V. 56. No. 42. P. 12119.
4. Fan J., Hong H., Jin H. Biomass and coal co-feed power and SNG polygeneration with chemical looping combustion to reduce carbon footprint for sustainable energy development: Process simulation and thermodynamic assessment // Renewable Energy, 2018. V. 125. P. 260.
5. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Перспективность низкосортных топлив томской области для теплотехнологического использования // Известия Томского политехнического университета, 2013. Т. 323. № 4. С. 41.
6. Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия Томского политехнического университета, 2012. Т. 320. № 4. С. 18.

T.R. Valiullin, D.O. Glushkov, K.K. Paushkina
National Research Tomsk Polytechnic University

ENHANCEMENT OF COMPOSITE FUEL BURNING OUT IN THE CONDITIONS OF DISPERSION

**ГИДРОДИНАМИКА РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО
ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ
В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ОБЛАСТИ**

С середины прошлого века оставался открытым вопрос о влиянии на теплоотдачу наложения пульсаций расхода; эта проблема изучалась как экспериментально, так и расчетно-теоретическим путем. Сведения о противоречивом характере указанного влияния получили объяснение лишь сравнительно недавно [1]. Оказалось, что среднее по периоду колебаний число Нуссельта \overline{Nu} только для небольших относительных амплитуд колебаний расхода $A < 1$ практически не меняется по сравнению с его значением Nu_s при стационарном течении и может даже уменьшаться. Вблизи входа в обогреваемый участок канала наблюдается незначительный, до нескольких процентов, максимум отношения \overline{Nu}/Nu_s . Однако этот максимум заметно возрастает с увеличением амплитуды колебаний $A > 1$.

Получение корректных результатов численного решения задачи о теплообмене при пульсирующем течении с $A > 1$ возможно лишь при специальной постановке граничных условий. Перед обогреваемым участком необходимо разместить адиабатический (необогреваемый) участок. Длина этого участка должна составлять несколько длин тепловой волны, тогда его наличие не будет влиять на результаты расчета в обогреваемой области. Длина тепловой волны обратно пропорциональна частоте колебаний, поэтому в квазистационарной области низкочастотных колебаний проведение расчетов с предвключенным адиабатическим участком не представляется возможным. В этом случае можно использовать прием, примененный в работе [2] – привлечь данные для стационарного течения.

Расчеты в работах [1], [2] выполнены для гидродинамически стабилизированного течения. На начальном гидродинамическом участке при пульсирующем течении данные и по гидродинамике, и по теплообмену отсутствуют. Поскольку теплообмен во многом определяется гидродинамикой потока, в первую очередь целесообразно рассмотреть задачу о пульсирующем течении на начальном гидродинамическом участке.

В [3] исследована длина участка гидродинамической стабилизации при пульсирующем течении в квазистационарной области. Используются имеющиеся в литературе зависимости для стационарного течения. Они

^(*) Е.П. Валужева, ep.valueva@gmail.com

получены для условия, когда на входе задается равномерный профиль скорости и на стенке выполняется условие прилипания, и для условия, когда на некотором удалении от входа в расчетную область стенка является линией тока. В последнем случае наблюдается некая аналогия между постановками гидродинамической и тепловой задач, когда перед обогреваемым участком имеется предвключенный адиабатический участок. В [3] установлено, что влияние на длину начального гидродинамического участка двух указанных постановок проявляется при малых числах Рейнольдса и не превышает нескольких процентов. Поэтому в данной работе на входе в канал задается равномерный профиль продольной скорости.

Решалась система уравнений движения и неразрывности для стационарного течения в плоском канале в приближении узкого канала

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \text{Po} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}, \quad \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

с граничными условиями симметрии на стенке и прилипания на оси.

Число Пуазейля (безразмерный градиент давления) $\text{Po} = -\frac{h^2}{\mu \langle \bar{u} \rangle} \frac{dp}{dx}$

находится из условия $\int_0^1 U dY = 1$. В результате численного решения методом конечных разностей получены зависимости для следующих величин: $U(X, Y)$, $\text{Po}(X)$, безразмерного касательного напряжения на стенке $\tau_c h / (\mu \langle \bar{u} \rangle)$. Путем специальных преобразований из этих величин в квазистационарном режиме получаются зависимости указанных величин от времени τ для случая, когда число Рейнольдса меняется во времени по зависимости $\text{Re} = \overline{\text{Re}}(1 + A \cos \omega \tau)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валуева Е.П., Пурдин М.С. Гидродинамика и теплообмен при пульсирующем с большими амплитудами ламинарном течении в каналах // ТиА, 2018. № 5. С. 735.
2. Валуева Е.П., Пурдин М.С. Теплообмен при ламинарном течении в прямоугольных каналах // ТиА, 2016. № 6. С. 893.
3. Валуева Е.П., Зюкин В.С. Влияние аксиальной теплопроводности стенки на температурный режим и эффективность теплообменных аппаратов с параллельным движением теплоносителей // Тр. Школы-семинара под рук. акад. А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло- массообмена в энергетических установках», 2019.

E.P. Valueva, V.S. Zyukin
Moscow Power Engineering Institute

HYDRODYNAMICS OF DEVELOPING PULSATING LAMINAR FLOW IN A FLAT CHANNEL IN THE QUASI-STATIONARY REGION

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

Высокотемпературные теплообменники необходимы в различных энергетических технологиях для обеспечения их высокой эффективности. Они разрабатываются для использования в качестве промежуточных теплообменников высокотемпературных ядерных реакторов, рекуператоров газовых турбин, для систем утилизации теплоты уходящих газов в различных отраслях промышленности, а также для установок на основе внешнего сжигания [1].

В работе проводится оптимизация конструкции высокотемпературного воздухонагревателя, используемого в схеме ПГУ с внутрицикловой газификацией [2]. В нем за счет сжигания угля осуществляется подогрев воздуха с давлением 2 МПа после циклового компрессора перед подачей его в камеру сгорания газовой турбины, а также дутьевого воздуха с давлением 3 МПа для подачи в газификатор до температуры 900°C, расходы воздуха составляют 553 кг/с и 63 кг/с соответственно. Согласно расчетам, схема с использованием воздухонагревателя позволяет снизить общее потребление угля для ПГУ на 15% по сравнению с классической схемой и сократить массо-габаритные характеристики оборудования острова газификации до 30%.

Температура подогрева в 900°C выбрана исходя из предельных возможностей единственного пока коммерчески доступного материала для изготовления поверхностей нагрева – жаропрочных

Воздухонагреватель разрабатывается по типу пылеугольного котла с нагревом воздуха в трубчатых радиационно-конвективных поверхностях нагрева. В качестве материала воздухонагревателя рассматривается жаропрочный никелевый сплав ХН60ВТ-ВД с защитным покрытием. В качестве последнего рассматриваются составы NiCrAlY и CrB₂+50%(Ni-Cr), нанесенные на образцы методом газоплазменного напыления, дополнительно исследуется возможность улучшения свойств покрытий путем оплавления их лазером после нанесения. Испытания покрытий осуществляется в натуральных условиях путем размещения образцов на опорных конструкциях пароперегревателя острого пара действующего пылеугольного котла.

При конструировании решаются 2 основные задачи: обеспечение условий надежной работы высокотемпературных поверхностей нагрева вблизи значений

^(*) Н.В. Вальцев, nvaltsev@mail.ru

эксплуатационных температур близких к предельным и максимальное сокращение размеров высокотемпературной части (стоимость никелевых сплавов на порядок превышает стоимость нержавеющей стали и может достигать до \$70/кг [1]). Ранее в работе [3] авторами рассматривался конвективный воздухонагреватель, позволяющий обеспечить облегченные условия работы выходной высокотемпературной секции. Недостаток конструкции в том, что она не позволяет заметно интенсифицировать теплообмен и сократить размеры аппарата и отличается повышенными эксплуатационными затратами. Как показали расчеты, при проектировании воздухонагревателя для выходных секций целесообразно использование труб малого 10-20 мм диаметра и высоких, свыше 20 м/с, скоростей воздуха, что позволяет получать коэффициенты теплоотдачи к воздуху более 600 Вт/м²*К, делая возможным размещение выходных пакетов воздухонагревателя в радиационной части котла.

В результате предложена новая конструкция аппарата с размещением выходных пакетов воздухонагревателя в нижней части топки для максимального сокращения дорогостоящих воздухопроводов к камере сгорания ГТУ. Для минимизации габаритов котла предлагается секционирование топки и размещение поверхностей по типу двусветных экранов, что позволит разместить большую поверхность теплообмена в единице объема.

В статье приведены результаты расчетов предлагаемого воздухонагревателя и его сравнение с конвективным вариантом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang X., Keramati H., Arie M., Singer F., Tiwari R., Shooshtari A., Ohadi M. Recent developments in high temperature heat exchangers: a review // *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 2018. V. 11, 18. P. 1-14.
2. Ryzhkov A., Bogatova T., Gordeev S. Technological solutions for advanced IGCC plant // *Fuel*, 2018. V. 214. P. 63-72.
3. Микула В.А., Рыжков А.Ф., Вальцев Н.В. Анализ возможности создания системы нагрева воздуха для ПГУ с внутрицикловой газификацией твердого топлива // *Теплоэнергетика*, 2015. №11. С. 9-14.

N.V. Valtsev, A.F. Ryzhkov
Ural Federal University

SELECTION OF THE DESIGN OF A HIGH-TEMPERATURE AIR HEATER FOR INTEGRATED GASIFICATION COMBINED CYCLE

А.И. Вальцева^{1,2, (*)}, А.С. Калякин¹, А.Н. Волков¹,
П.С. Першин¹, А.В. Суздальцев¹, Ю.П. Зайков^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрОРАН,
²Уральский Федеральный Университет

РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ КИСЛОРОДА ДЛЯ РЕАКТОРОВ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

Будущее атомной энергетики многих стран связано с реакторами на быстрых нейтронах, с использованием новых видов топлива и более оперативных схем переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ)[1]. Одна из перспективных схем переработки включает пирохимическую переработку в расплавленных солях, позволяющую исключить длительное хранение ТВС с ОЯТ в хранилищах и позволяющую практически полностью регенерировать компоненты топлива. Во многих странах разрабатываются комплексные схемы пирохимической переработки ОЯТ, включающие ряд технологических операций в реакторах с расплавленными солями и инертной атмосферой – это касается операции восстановления окисленного ОЯТ преимущественно металлическим литием при электролизе расплавов LiCl-Li₂O. Технологические параметры и стабильность операции определяется кислородосодержанием солевого расплава и парциальным давлением кислорода над расплавом. Стоит отметить, что при восстановлении окисленного ОЯТ, контроль и поддержание заданной концентрации ионов кислорода в расплаве в определенном диапазоне является обязательным фактором. Для контроля содержания кислорода непосредственно в реакторах с оксидно-хлоридными расплавами наиболее перспективными представляются электрохимические сенсоры на твердых электролитах [3].

Разработанный сенсор представляет собой две совмещенные электрохимические ячейки на основе кислородопроводящего твердого электролита YSZ (ZrO₂-Y₂O₃) с общим эталонным электродом. На рисунке 1 приведены схема и общий вид образца сенсора. Выбранный твердый электролит является селективным по кислороду и обладает ионным числом переноса равным 1. Предварительные исследования, проведенные в ходе выполнения данной работы и рядом зарубежных авторов [2-3], показали относительно хорошую химическую и эрозионную стойкость образцов YSZ в исследуемых расплавах. Принцип работы сенсора заключается в измерении потенциалов между общим эталонным электродом и каждым из экспериментальных электродов. Сенсор кислорода в расплаве LiCl-Li₂O реагирует на изменение концентрации оксида Li₂O, при этом в измеренном диапазоне концентраций Li₂O зависимость ЭДС2 сенсора является линейной и воспроизводимой. Контроль парциального

(*) А.И. Вальцева, a.i.valtseva@urfu.ru

давления кислорода в атмосфере над расплавом показал, что состав атмосферы при постоянном содержании Li_2O стабилен, при этом повышение содержания оксида в расплаве приводит к увеличению кислородосодержания в атмосфере над расплавом.

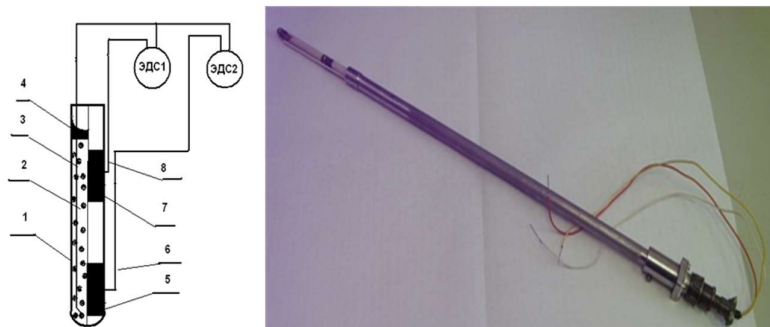


Рис. 1. Схема и общий вид сенсора: 1 – твердоэлектролитная пробирка YSZ; 2 – эталонный электрод Ni-NiO; 3 -потенциалосъемник эталонного электрода; 4 – герметик; 5 – измерительный электрод в расплаве; 6 – потенциалосъемник измерительного электрода в расплаве; 8 – потенциалосъемники измерительного электрода в атмосфере; 7 – измерительный электрод в атмосфере; 8 – потенциалосъемник с измерительного электрода для газа; ЭДС1 и ЭДС2 – потенциометры

В целом сенсор был экспериментально испытан и показал хорошую работоспособность в течение более 500 часов при 20 теплосменах. Это указывает на возможность его использования для контроля пирохимических процессов переработки ОЯТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. М.: Техносфера, 2013. 240 с.
2. Першин П.С., Вальцева А.И., Суздальцев А.А., Зайков Ю.П. Поведение кислородопроводящих керамических материалов в расплавах хлорида лития // Бутлеровские сообщения, 2018. Т.56(10). С.81-94
3. Merwin A., Williamson M.A., Willit J.L., Chidambaram D. Metallic lithium and the reduction of actinide oxides // Journal of Electrochemical Society, 2017. V.168(8). Pp. H5236-H5246

A.I. Valtseva^{1,2}, A.S. Kalyakin¹, A.N. Volkov¹,
P.S. Pershin¹, A.V. Suzdaltsev¹, Yu. P. Zaikov^{1,2}

¹Institute of high-temperature electrochemistry of UB RAS,
²Ural Federal University

DEVELOPMENT OF OXYGEN SENSOR FOR PYROCHEMICAL REACTORS OF SNF REPROCESSING

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЙОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Любая теплообменная система (теплообменный аппарат) оценивается основным показателем качества - энергетической эффективностью. Этот показатель, заложенный на стадии проектирования, характеризует и функционирующий аппарат.

Основным элементом теплообменника является теплообменная поверхность, которая в случае рекуператоров обтекается с одной стороны горячим, с другой стороны холодным теплоносителем (двустороннее обтекание). Следует различать:

1. Энергетическую эффективность поверхности теплообмена, омываемую горячей или холодной средой.

2. Энергетическую эффективность теплообменного аппарата в целом, в котором имеет место теплопередача от горячего к холодному теплоносителю.

Эти понятия неразрывно связаны, но энергоэффективность теплообменника понятие более широкое и в общем случае представляет отношение действительно переданного теплового потока в теплообменнике к максимально возможному. Энергоэффективность же теплообменной поверхности обычно определяют соотношением теплового потока к затратам энергии на прокачку теплоносителя вдоль этой поверхности.

При расчётах энергоэффективности теплообменников при противотоке может использоваться метод, изложенный в [1], в котором поверхность теплообменника F связывается с массовой теплоёмкостью теплоносителя C_p , его расходом G , разностью температур реальной (для противотока) и максимальной.

$$\dot{\epsilon} = NTU_{\min} \Delta T / \Delta T_{\max}$$

где: $NTU_{\min} = kF / (Gc_p)_{\min}$

Однако, такое определение энергоэффективности приемлемо на стадии проектирования и во многом идеально, т.к. не учитывает многочисленных факторов реальных аппаратов (надёжность, ремонтоспособность, экологичность, стоимость материала и проч.). Эти факторы необходимо учитывать, когда речь идёт о повышении эффективности работающего оборудования.

Конвективные рекуперативные теплообменные аппараты с двусторонним обтеканием типа «газ-жидкость» - водогрейные котлы имеют широкое применение в настоящее время в районных тепловых пунктах (районные

^(*) В.С. Шарапов, sharapov.vl09@gmail.com

котельные). В представленной работе рассмотрено повышение энергетической эффективности отопительной котельной №1 в г. Сургут двумя способами:

1. Путем замены 6 паровых котлов марки ДКВР-10/13 (Бийский Котельный Завод) на 4 водогрейных котла марки Buderus Logano S825M (Германия).

2. Путём модернизации котла ДКВР-10/13 с заменой его поверхности нагрева и переводом его работы на водогрейный режим.

Для осуществления обозначенной цели были решены следующие задачи:

1. Определены увеличившиеся нагрузки на потребителей;

2. Произведен расчет тепловой схемы водогрейной котельной №1[2] в г.Сургуте;

3. Подобрано основное и вспомогательное оборудование;

4. Определены капиталовложения в реконструкцию котельной и основные технико-экономические показатели в обоих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теплообменникам./ Пер. с английского./ Под ред. Б.С.Петухова, В.К.Шикова. М.: Энергоатомиздат. 1987. Т.1
2. ВКР на тему «Разработка предложений по модернизации отопительной котельной г. Сургут с увеличением мощности»/ В.С. Шаратов.// Теплотехника и теплоэнергетика. – 2018. С. – 68.

V.I. Velichko, V.S. Sharapov
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF DISTRICT HEATING POINTS DURING DESIGN AND OPERATION

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАКРУТКИ НА ТЕПЛООТДАЧУ
КОМБИНИРОВАННОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУИ**

Проблема охлаждения высокотемпературных поверхностей относится к одному из приоритетных направлений в энергетическом и авиационно-космическом машиностроении, а также во многих других областях техники. Существуют различные способы повышения качества тепловой защиты, одним из наиболее эффективных является струйный обдув поверхности. Значительная интенсификация теплообмена при струйном натекании потока на поверхность и относительная простота регулирования распределения расхода охладителя и тепловых потоков обусловили широкое применение этого способа охлаждения в различных областях техники, в том числе и в системах охлаждения лопаток газовых турбин.

Результаты ряда исследований показали [1], что при натекании осевых струй максимальная теплоотдача достигается в зоне торможения потока и уменьшается с увеличением радиального расстояния. Закрученные струи, вследствие действия центробежных сил, имеют большую площадь воздействия в поперечном сечении. Однако, в центральной части закрученной струи формируется зона обратных токов с низкими скоростями и слабой интенсивностью теплоотдачи, что может привести к перегреву поверхности и её прогару. Для решения данной проблемы предложен комбинированный насадок [1], состоящий из центрального сопла, из которого истекает струя осевого направления, и периферийного кольцевого, формирующего закрученную струю. В результате взаимодействия двух струй – осевой и закрученной дополнительно турбулизируется поток, что позволяет повысить равномерность профиля осевой скорости струи перед поверхностью, на которую осуществляется натекание, и интенсифицировать среднюю теплоотдачу.

Существующие исследования не содержат обобщающего анализа зависимости коэффициента теплоотдачи от перепада давления, а также от числа тангенциальных подводов. Указанная проблема определила актуальность данной работы, направленной на анализ процессов теплообмена при взаимодействии комбинированной импактной струи с высокотемпературной поверхностью.

В рамках работы выполнены экспериментальные исследования при натекании комбинированной импактной струи на поверхность пластины.

^(*) О.А. Евдокимов yevdokimov_oleg@mail.ru

Исследования проводились с пятью различными закручивающими устройствами (насадками), отличающимися числом тангенциальных подводов кольцевого сопла (от 2 до 8 подводов), остальные геометрические параметры насадка не изменялись.

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи комбинированной импактной струи позволяют выделить три характерные области по числу Рейнольдса. В первой области при числе Рейнольдса струи $Re < 5 \cdot 10^4$ наблюдается снижение средней теплоотдачи с ростом числа Рейнольдса, что характерно для ламинарного режима течения в пограничном слое, формирующемся на охлаждаемой поверхности. В районе $Re \approx 5 \cdot 10^4$ наблюдаются минимальные значения средних коэффициентов теплоотдачи $\alpha \approx 150$ Вт/(м²К). Наличие минимума обусловлено началом турбулизации ламинарного пограничного слоя на охлаждаемой поверхности. В диапазоне Re от $5 \cdot 10^4$ до $5,5 \cdot 10^4$ находятся вторая область, где увеличение теплоотдачи происходит с ростом Re . В этой области пограничный слой, формирующийся после соударения струи с поверхностью пластины, турбулизируется, что и обуславливает увеличение коэффициента теплоотдачи. В третьей области при $Re > 5,5 \cdot 10^4$ теплоотдача стабилизируется вблизи значений $Nu \approx 36$.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами выполненных численных расчётов показывает некоторое количественное, а иногда и качественное, расхождение. Численное моделирование показывает более плавное изменение коэффициента теплоотдачи с ростом Re , по сравнению с экспериментом и, вероятно, не вполне разрешает ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое, формирующемся на поверхности. На основании результатов экспериментов выполнено уточнение критериальных уравнений, полученных при обобщении расчётных данных:

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-79-00180 «Теплофизика комбинированных реагирующих и импактных струйных течений».

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиралишвили Ш.А., Веретенникова Е.О., Веретенников С.В. Экспериментальное исследование теплообмена при охлаждении поверхностей комбинированными импактными струями // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьёва, 2014. – №2(29). С. 100-6.

S.V. Veretennikov, O.A. Evdokimov
Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University

INFLUENCE OF SWIRLING INTENSITY ON THE HEAT TRANSFER OF A COMBINED IMPINGEMENT JET

ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Интенсификация испарения является актуальной задачей, так как испарение жидкости используется во многих областях техники от ракетных двигателей до сушилок [1,2]. Одним из способов повышения эффективности испарения является воздействие на жидкость электрического поля [3,4].

Кинетика процесса испарения жидкости в значительной степени определяется физико-химическими свойствами поверхности [5]. При воздействии поля на поверхности жидкости формируется ионный слой, который в зависимости от ориентации поля может способствовать увеличению скорости испарения. Для воды поле должно быть направлено к поверхности.

Оценим толщину активного воздействия поля на поверхность. Для этого используем данные по скорости испарения воды в работе [5]. Согласно этим данным изменение массы воды за счет испарения в поле и без поля отличаются примерно в 2 раза.

Поверхность жидкости покидают молекулы с энергией не меньше некоторого значения E , которое можно определить по величине теплоты испарения жидкости. Число таких молекул определяется статистикой Больцмана и, следовательно

$$n \sim \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1)$$

Электрическое поле, уменьшает энергию, которой должна обладать молекула на величину

$$\Delta E = \left(\frac{U}{d}\right) qa \quad (2)$$

Где a -толщина слоя, из которого вылетают молекулы, U – напряжение внешнего электрического поля создаваемого на расстоянии d , q -характерный заряд молекулы, реагирующий на поле. Следовательно аналогично (1) с учетом (2) получим.

$$n_E \sim \exp\left(-\frac{E - \Delta E}{kT}\right) \quad (3)$$

Отношение числа молекул покидающих жидкость в присутствии поля и без него примет, таким образом, следующий вид

^(*) М.Н. Сергеев, mihail_sergeev@mail.ru

$$\ln\left(\frac{n_E}{n}\right) = \frac{\Delta E}{kT} \quad (4)$$

Отношение числа молекул пропорционально их массе, следовательно можно считать, что $n_E/n = m_E/m$. Исходя из этого и выражений (2) и (4) можно найти величину a . Для удобства оценки отнесем величине межмолекулярного расстояния a_m , которое можно оценить через объем, приходящийся на одну молекулу, т.е.

$$a_m = \sqrt[3]{\mu/(\rho N_a)} \quad (5)$$

Выражая толщину слоя из (2) с учетом (4) найдем окончательно оценку т.е.

$$\frac{a}{a_m} = \frac{dkT}{qU\sqrt[3]{\mu/(\rho N_a)}} \ln\left(\frac{m_E}{m}\right) \quad (6)$$

Используем данные из работы [5] т.е. $U=15\text{кВ}$, $d=11.2\text{мм}$, $T=293\text{К}$, $\rho=1000\text{кг/м}^3$, $\mu=18\text{г/моль}$, $N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/К}$, $m_E/m = 2$. Величину характерного заряда q можно оценить по дипольному моменту молекулы воды $p=1.84\text{Д}$ и её размеру $L=0.3\text{нм}$, т.е. $q=p/L=0.2 \cdot 10^{-19}\text{Кл}$. Подставляя эти данные в (6) получим $a/a_m=1.6$. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее активное воздействие электрического поля на поверхность воды имеет место на глубине в 1-2 молекулярные слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газеев М.В., Газеева Е.А., Чернышев О.Н., Золкин А.П. Исследование кинетики испарения растворителей лакокрасочных материалов в электрическом поле аэроионизационного устройства. Вестник технологического университета. 2017., т.20, №4, с.50-53
2. Кардашев Г.А., Михайлов П.Е. Теплообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение, 1973, 223 с.
3. Чураев Н.В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах. М.: Химия, 1990.-272с.
4. Селитреников А.В., Зевацкий Ю.В. Влияние электрического поля на скорость испарения жидкостей. /ЗАО "Новбытхим", СПбГТИ(ТУ) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического ин-та(технического ун-та). - 2010. - № 7 . - С. 33 - 36
5. Красиков Н.Н. О бесконтактном электрополевым воздействии на жидкие системы. ЖТФ, 2000, том 70, вып.10, с.120-121.

S.V. Veretennikov, O.A. Evdokimov, M.N. Sergeev
Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University

**TO ESTIMATE THE DEPTH OF THE ACTIVE INFLUENCE OF THE
ELECTRIC FIELD ON THE SURFACE OF THE EVAPORATING LIQUID**

**СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ УГОЛЬНЫХ,
ДРЕВЕСНЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Коммунальный сектор, энергетические, добывающие и перерабатывающие предприятия являются основными источниками загрязнения городской и природной среды, формируя ежедневно большой объем опасных газообразных, жидких и твердых отходов. Многие из этих отходов можно рассматривать в качестве потенциального топлива с относительно высокой (для отходов) теплотой сгорания (10–20 МДж/кг). Вовлечение таких отходов в энергетику целесообразно с точки зрения сохранения ресурса ценных и дефицитных топлив и частичного снижения антропогенного воздействия на природу.

В данной работе проанализированы энергетические характеристики (времена задержки газофазного и гетерогенного зажигания, температуры зажигания и горения, теплота сгорания) совместной утилизации отходов и низкосортных топлив по технологиям слоевого и суспензионного сжигания. Полученные данные способствуют созданию основ для разработки технологий утилизации техногенных и растительных отходов. Целью данной работы является определение и анализ основных параметров зажигания и горения сухих и водосодержащих топливных смесей на основе низкосортных компонентов.

Для приготовления топлив использовались сосновые опилки, фильтр-кек (отход флотации каменного угля марки Д), угольная пыль марки Д и картон. Для сопоставления характеристик зажигания и горения смесей на основе опилок и фильтр-кека определялись аналогичные характеристики для смесей с добавками угля, а также распространённого бытового отхода (картона).

Экспериментальная установка включала следующие элементы: трубчатая муфельная печь (камера сгорания); приводное устройство (координатный механизм) для подачи образца топлива в печь; высокоскоростная видеокамера для записи исследуемого процесса; компьютер для управления видеозаписью и устройством подачи образца топлива. Температура в муфельной печи варьировалась в диапазоне 300–900°C. В экспериментах сравнивались характеристики зажигания и горения навесок твердых топлив с равными массами (около 0.004 г). При сжигании суспензии формировалась одиночная капля с начальным диаметром около 2 мм. Масса капель такого размера при изменении состава суспензии варьировалась в усредненном диапазоне 0.006–0.01 г. Размер капли определялся по ее изображению, зафиксированному видеокамерой. В результате измерения размера не менее чем в трех сечениях

^(*) К.Ю. Вершинина, vershininaks@gmail.com

определялся средний диаметр капли. Методики регистрации основных параметров зажигания и горения смесевых топлив аналогичны экспериментам [1]. Зарегистрированные минимальные температуры зажигания и максимальные температуры горения исследуемых топливных композиций представлены в табл.1.

Таблица 1. Температуры зажигания и горения исследуемых топлив.

Состав топлива	Минимальная температура зажигания, °С	Максимальная температура горения (при 700 °С), °С
50% опилки, 50% фильтр-кек	350	902
25% опилки, 25% фильтр-кек, 50% вода	340	890
50% опилки, 50% угольная пыль	355	934
25% опилки, 25% угольная пыль, 50% вода	345	920
50% опилки, 50% картон	340	887
25% опилки, 25% картон, 50% вода	325	870

Смеси на основе опилок и картона характеризовались наименьшими временами иницирования горения, поэтому их целесообразно использовать для быстрого прогрева топочного пространства до температур, достаточных для стабильного газофазного и гетерогенного зажигания смесей, горючая основа которых может быть представлена более калорийными компонентами – угольной пылью, а также отходами углеобогащения (фильтр-кеком, шламом). Замена угольной пыли на флотационный отход в сжигаемом композиционном топливе представляется целесообразной в экологическом и экономическом аспектах, несмотря на ухудшение основных энергетических характеристик (время задержки зажигания увеличивается в 0.8–1.6 раз; теплота сгорания снижается на 1.7–3.9 МДж/кг; температура зажигания увеличивается на 10–15 °С). Следует также отметить, что водосодержащие суспензии существенно проигрывают по теплоте сгорания сухим смесям. Однако суспензионное сжигание позволяет утилизировать многие компоненты (влажные шламы, фильтр-кеки, древесные отходы и др.) без предварительного просушивания. Также за счет наличия воды и меньшей температуры в зоне горения становится возможным получение экологических выгод в виде существенного снижения выбросов оксидов азота и серы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals// J Hazard. Mat. 2017. V. 338. P. 148–159.

K.Yu. Vershinina, V.V. Dorokhov, D.S. Romanov
National Research Tomsk Polytechnic University

CO-COMBUSTION OF COAL, WOOD AND DOMESTIC WASTE

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА УТИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Компримирование газа на компрессорных станциях (КС) является наиболее энергоемким теплоэнергетическим процессом газотранспортных систем [1], поэтому решение задачи снижения затрат энергоресурсов на перекачку газа, в первую очередь, должно быть направлено на повышение эффективности работы "сердца" КС - газопоршневого агрегата (ГПА). Число установленных ГПА в РФ превышает 4000 шт., 85% которых имеют привод от газотурбинных установок (ГТУ) [2]. Учитывая большой парк ГПА в России, потери теплоты с уходящими газами составляют огромную величину (по различным оценкам, до 80 ГВт), что делает поставленную задачу экономически целесообразной.

Анализ технологических параметров работы современных ГПА с приводом от ГТУ позволяет судить о применимости технологии органического цикла Ренкина (ОЦР) для повышения их энергетической эффективности.

Одним из наиболее распространенных ГПА в России является ГПА-16, приводом которого могут быть различные ГТУ (табл. 1).

Таблица 1. Основные технические характеристики ГТУ для ГПА-16

ГПА	ГТУ	КПД, %	Расход уходящих газов, кг/с	Температура уходящий газов, оС
ГПА-16 «Волга»	НК-16СТ	29,0	103,1	378
ГПА-16 «Волга»	НК-38СТ	38,0	102,0	445
ГПА-16 «Волга»	НК-16-18СТ	31,0	106,0	427
ГПА-16 «Ладога»	T16	36,0	54,6	492
ГПА-16 Р «Уфа»	АЛ-31СТ	36,5	64,5	490

Реализация ОЦР возможна на различных рабочих веществах (РВ). Для анализа энергетической эффективности утилизационной установки на выхлопе ГТУ ГПА были выбраны следующие РВ: диоксид углерода (R744); октафторциклобутан (Rc318); 1.1.1.3.3-пентафторпропан (R245fa), пентан (R601) и пропан (R290).

^(*) И.С. Антаненкова, antanenkovais@mail.ru

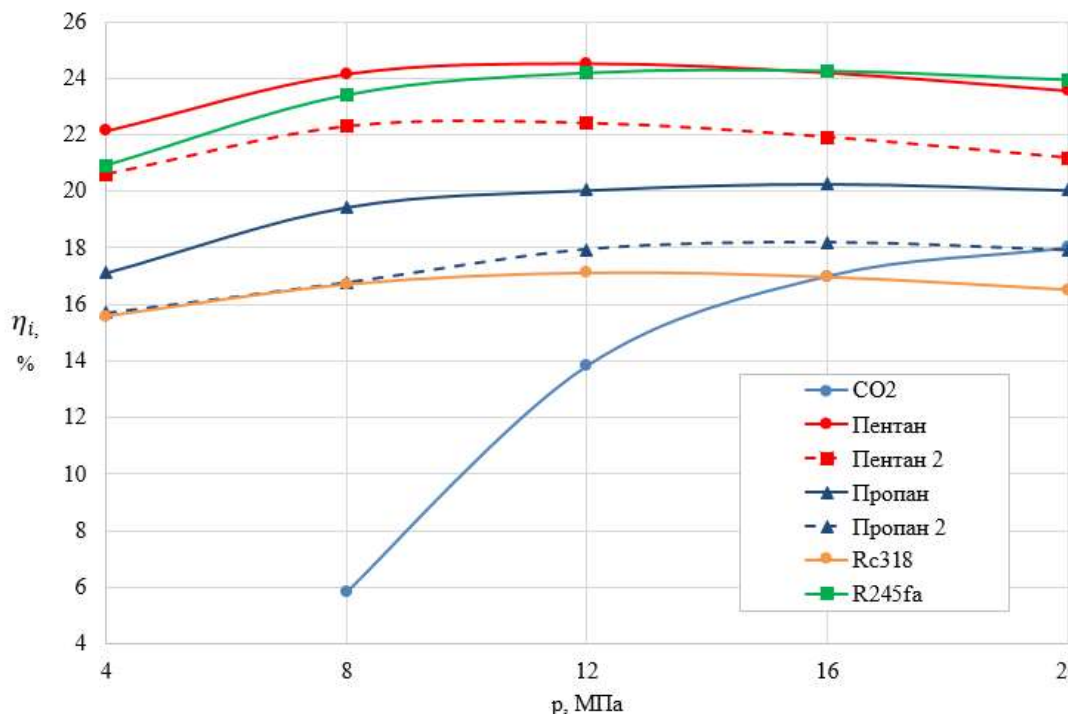


Рис. 1. Зависимость КПД утилизационной ОЦР-установки от начального давления

Расчёты одноконтурной схемы утилизации произведены при температуре уходящих газов на выхлопе ГТУ 380 °С, температуре РВ в конденсаторе 25 °С, КПД турбины 75%, КПД насоса 50%; недоохлаждение в рекуператоре принято 10 °С, недогрев РВ в парогенераторе - 20 °С. Штриховыми линиями на рис. 1 обозначены результаты расчёта с учётом дополнительного недогрева РВ при наличии промежуточного теплоносителя между уходящими газами ГТУ и горючими РВ утилизационной установки (двухконтурная схема ОЦР).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00324.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. №1715-р. Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года // Собрание законодательства РФ. 2009. № 48. Ст. 5836. - 103 с.
2. Крюков О.В. Энергосберегающие ORC-технологии получения электроэнергии из тепла отработанных газов автономных газотурбинных установок // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т.4. № 2. С.40-7.

A.A. Vetrenko, I.S. Antanenkova
National Research University «MPEI»

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE CYCLE EFFICIENCY OF THE RECYCLING INSTALLATIONS FOR GAS TRANSMISSION SYSTEMS

ПОЛУЧЕНИЕ АМОРФНЫХ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПАРОВОГО ВЗРЫВА

Аморфные металлы (АМ) обладают уникальными магнитными и механическими характеристиками [1]. Другой их важной особенностью является повышенная способность к накоплению водорода [2] (на 50 % и более, чем у сплавов с кристаллической структурой). Поэтому АМ крайне привлекательно использовать в конструкциях перспективных металлогидридных накопителей водорода.

В современной технической литературе описаны разнообразные методы получения АМ [1], среди которых особый интерес с точки зрения реализации больших скоростей охлаждения V_t представляет способ, основанный на взрывной фрагментации перегретого расплава при его взаимодействии с холодной жидкостью, например, с водой. По оценкам [3] значение V_t в этом случае может достигать 10^9 К/с. Следует отметить, что в настоящее время существует несколько десятков разнообразных физических (термомеханических, гидродинамических, кавитационно-акустических) гипотез, посвященных причинам фрагментации, что, по всей видимости, свидетельствует не только о неполной изученности вопроса, но и, с большой вероятностью, об отсутствии единого универсального механизма исследуемого явления.

В этом контексте в докладе изложены наиболее вероятные механизмы фрагментации горячих образцов в подобных условиях (мы полагаем, что для описания тонкой фрагментации расплава – наиболее практически важного типа дробления, особенно продуктивной может оказаться кавитационно-акустическая модель протекания процесса). Кроме того в нем представлены описания конструкции лабораторной установки и методики проведения опытов, а также приведены результаты экспериментально-расчетных исследований, подтверждающих работоспособность предлагаемой технологии. Опыты были проведены на специально созданной установке (рис. 1). Твердотельные образцы, изготовленные из различных металлов (олово, цинк, медь, сталь, сплав никеля с лантаном NiLa₅), размещались в инертной газовой среде и нагревались в режиме левитации высокочастотным (частота электрического тока 250 кГц) индуктором. Максимальная температура нагрева для образцов из шарикоподшипниковой стали превышала 1600°C. Затем в расплавленном состоянии образцы (капли) падали в кювету, заполненную дистиллированной водой комнатной температуры. В экспериментах контролировалась температура левитирующего

^(*) Ю.П. Ивочкин, ivochkin@yandex.ru

образца и велась видеозапись его поведения в процессах индукционного нагрева и дробления.

Результаты исследований подтвердили возможность моделировать процесс фрагментации капель с помощью разработанной методики. Типы фрагментации (взрывная или спокойная), формы осколков и их размеры определяются, главным образом, степенью окисленности поверхности расплава и его температурой. Минимальные радиусы образующихся частиц при тонкой фрагментации не превышали нескольких микрометров, а скорость их разлета при взрывном разрушении капли может достигать десятки метров в секунду. Численные оценки свидетельствуют, что в подобных условиях скорость охлаждения частиц может достигать значений $10^9 - 10^{10}$ К/с, достаточных для получения большинства металлов и сплавов с аморфной структурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-01497).

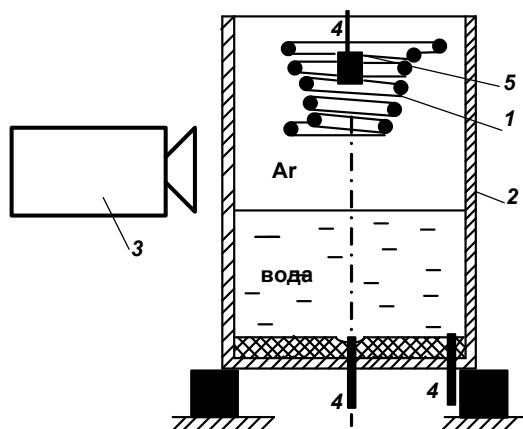


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – индуктор; 2 – корпус; 3 – видеокамера; 4 – термопары; 5 – образец

ЛИТЕРАТУРА

1. Херлах Д., Галенко П., Холланд-Мориц Д. Метастабильные материалы из переохлажденных расплавов. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. 496 с.
2. Вьюгов П.Н., Дмитренко А.Е. Металлические стёкла // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники, 2004. № 6. (14), С. 185.
3. Furuya M. Method for producing amorphous metal, method and apparatus for producing amorphous metal fine particles, and amorphous metal fine particles // Patent No.: US 7,008,463 B2 Mar. 7, 2006.

D.A. Vinogradov, Yu.P. Ivochkin, K.G. Kubrikov, I.O. Teplyakov
Union Institute for High Temperature RAS

MAKING OF AMORPHOUS METAL-HYDRIDE MATERIALS BY THE STEAM EXPLOSION

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

Численно исследована структура электровихревых течений жидкого металла в полусферическом контейнере при влиянии внешнего осевого магнитного поля (МП). Получена зависимость суммарной кинетической энергии в контейнере от внешнего МП.

При пропускании электрического тока через объем жидкого металла возникает объёмная вихревая сила $\mathbf{F}=\mathbf{J}\times\mathbf{B}$ (здесь, \mathbf{J} и \mathbf{B} – плотность электрического тока и магнитная индукция созданного им поля), приводящая в случае пространственно неоднородного распределения \mathbf{J} к образованию т.н. электровихревого течения (ЭВТ) [1]. В полусферической системе с центральным электродом, без внешних магнитных полей, ЭВТ имеет форму тороидального вихря, см. рис. 1а. Внешнее осевое магнитное поле приводит к азимутальной закрутке течения (рис. 1б), при этом возникает вихрь направленный противоположно основному течению (рис. 1в,1г) [2-4].

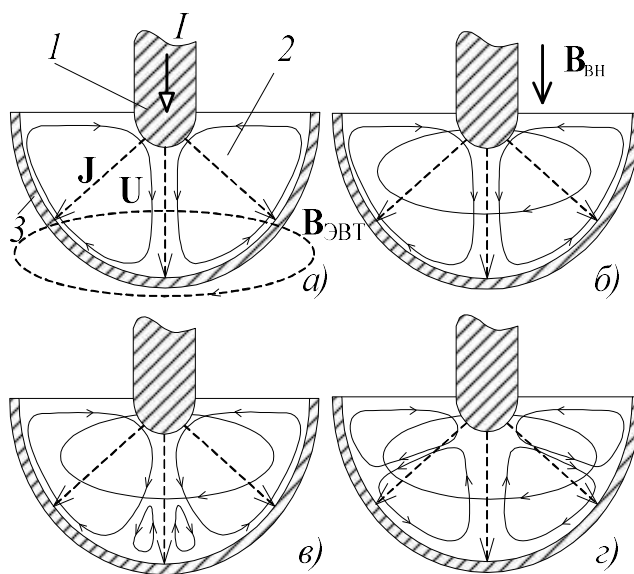


Рис. 1. Структура ЭВТ под действием внешнего осевого магнитного поля. 1 -малый электрод, 2 - жидкий металл, 3 - контейнер-электрод. а) ЭВТ имеет вид тора, б) появление азимутальной закрутки, в) возникновение вторичного вихря, г) двухвихревое вращающееся ЭВТ

^{*)} И.О. Тепляков, igor.teplyakov@mail.ru

Численные расчеты проводились методом контрольного объема на неструктурированной сетке, решалось нестационарное уравнение движения при использовании $k-\omega$ SST модели турбулентности в безындукционном приближении [5]. Были рассчитаны режимы ЭВТ при электрических токах 100, 400, 600 и 800А в диапазоне внешних магнитных полей от 5×10^{-5} до 1 Тл и получена зависимость суммарной кинетической энергии в объеме жидкого металла от величины внешнего МП. При электрическом токе 100А при МП 5×10^{-5} Тл имеет место двухвихревая система ЭВТ, кинетическая энергия возрастает и при МП 8×10^{-3} Тл достигает максимума, а затем уменьшается, подавляемая внешним МП. При электрических токах 400, 600 и 800А в области малых внешних МП (до 2×10^{-4} Тл) ЭВТ имеет вид одиночного тороидального вихря, при росте внешнего МП ЭВТ переходит в двухвихревую систему (кинетическая энергия уменьшается и достигает минимума когда образуется второй вихрь), далее кинетическая энергия начинает возрастать, отметим, что с ростом электрического тока максимум кинетической энергии смещается в область больших внешних МП.

Работа поддержана грантом РФФ № 17-19-01745.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояревич В.В., Фрейберг Я. Ж., Шилова Е. И., Щербинин Э. В. Электровихревые течения. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
2. В.Г.Жилин, Ю.П.Ивочкин, И.О.Тепляков. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений. // Теплофизика высоких температур №6, 2011, с. 957-959.
3. Жилин В.Г., Ивочкин Ю. П., Игумнов В. С., Оксман А. А. Экспериментальное исследование электровихревых течений в полусферическом объеме // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 490–491.
4. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О, Гусева А.А. Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения // ТПТ. 2012. № 8. С. 5-11.
5. Teplyakov I., Vinogradov D., Ivochkin Yu, Kharicha A, Serbin P. Applicability of different MHD approximations in electrovortex flow simulation // Magnetohydrodynamics 2018 54, No. 4, p 403-416.

D.A. Vinogradov, I.O. Teplyakov, Yu.P. Ivochkin
Joint Institute for High Temperature of RAS

EXPOSURE OF AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON THE INTENSITY OF ELECTROVORTEX FLOW

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

До настоящего времени основным средством мониторинга в дизельном двигателе остаётся индицирование. Однако оно не позволяет оценить влияние состава топлива на эффективность рабочего цикла и, тем более, вести мониторинг в режиме реального времени [1].

Предложено использовать возможности градиентной теплотметрии [2] для мониторинга многотопливного дизельного двигателя. Гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП) способны работать в агрессивной среде камеры сгорания продолжительное время.

Исследование проводилось на вихрекамерном автотранспортном дизельном двигателе Indenor XL4D на режиме холостого хода в диапазоне частот вращения $n = 800-1600$ об/мин.

На рис.1 показано влияние расхода топлива на экстремальные значения плотности теплового потока. При всех режимах работы наблюдается двойное сгорание, причем второй максимум больше первого.

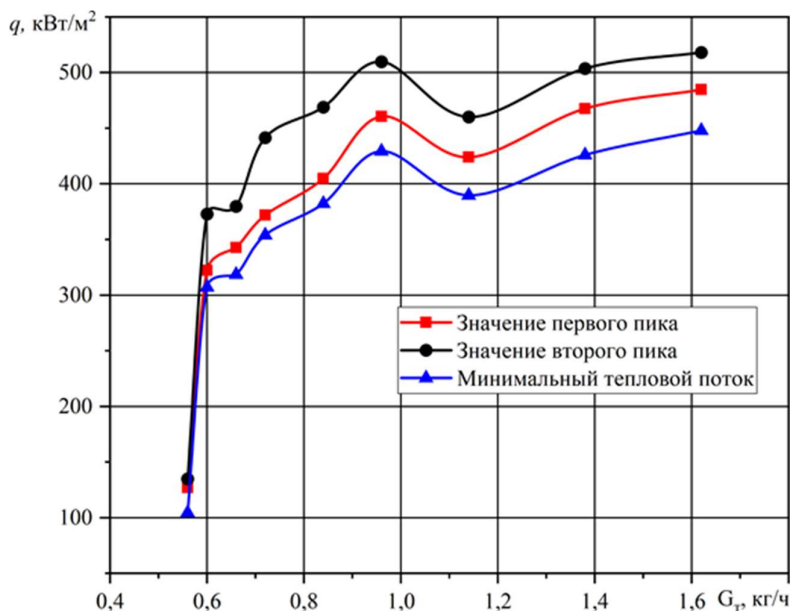


Рис. 1. Влияние расхода топлива на тепловой поток

^(*) А.В. Винцаревич, vincarevich@yandex.ru

Среднее значение теплового потока для $G_T = 0,56$ кг/ч (что соответствует частоте вращения $n = 800$ об/мин) значительно меньше, чем для остальных режимов. На этом режиме работа двигателя была неустойчивой, наблюдались пропуски вспышек; при этой частоте вращения топливо не может нормально воспламениться и полностью сгореть. С увеличением расхода плотность теплового потока сначала растет, а при $G_T = 1,14$ кг/ч (что соответствует частоте вращения $n = 1400$ об/мин) уменьшается. Поскольку ГГДТП установлен на стенке камеры сгорания (КС) и регистрирует тепловой поток, передаваемый в систему охлаждения, снижение плотности теплового потока можно объяснить оптимальным режимом работы двигателя.

В отличие от датчиков давления, ГГДТП позволяют контролировать не только рабочий процесс, но и процесс сгорания, а также теплонапряженность деталей двигателя. Предлагаемая методика позволит проводить индивидуальный мониторинг рабочего процесса в каждом цилиндре дизеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Sivaramakrishnan, Investigation on performance and emission characteristics of a variable compression multi fuel engine fuelled with Karanja biodiesel–diesel blend // Egyptian Journal of Petroleum (27), p. 177-186, 2018.
2. Сапожников С. З, Митяков Ю. В., Митяков А. В. Основы градиентной тепло-метрии. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.

A.V. Vintsarevich, A.V. Mityakov, D.V. Gerasimov, M.V. Yamashkin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

RESEARCH OF HEAT TRANSFER IN COMBUSTION CHAMBER OF DIESEL ENGINE ON IDLE BY GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT METHOD

ТРАНСФОРМАЦИЯ МАССИВОВ ЖИДКОСТИ ПРИ ИХ СВОБОДНОМ ПАДЕНИИ

При анализе результатов исследований [1-2] можно сделать вывод о том, что процессы разрушения жидкостных массивов воды в потоке газа изучены не в полной мере. В настоящее время не разработано общей теории распада жидкостных массивов на мелкие фрагменты и капли. Недостаточно эмпирических данных о закономерностях распада при свободном падении массивов жидкости (особенно для растворов и суспензий). Однако развитие за последние несколько лет оптических методов, высокоскоростной съемки и современных программно-аппаратных комплексов [3] сделало возможным проведение таких исследований.

В данной работе представлены результаты экспериментов, выполненных на специализированном полигоне, по исследованию распределения числа отрывающихся с поверхности массива фрагментов жидкости (воды, суспензий и растворов) с использованием высокоскоростной съемки.

В качестве жидкости для массивов использовались следующие составы: вода без примесей; солевой раствор бишофита (массовая концентрация $\gamma_m \approx 8\%$); суспензия бентонита (массовая концентрация $\gamma_m = 5-10\%$); эмульсия пенообразователя Файрекс (объемная концентрация $\gamma_v \approx 0.3\%$). По результатам анализа выполненных исследований рассчитывались: средний радиус образовавшихся капель (r , мм); количество образовавшихся капель (N); количественная концентрация образовавшихся капель ($N(n), \%$); объемная концентрация образовавшихся капель ($N(v), \%$).

Для обработки результатов использовалось ПО «ActualFlow» (пакет Multiphase Kit), применялся метод анализа теневых изображений с предварительной фильтрацией и алгоритмом определения границ капель. Для этого полученные в ходе испытаний видеозаписи раскадровывались, после чего полученные изображения подвергались обработке. В ходе обработки капли делились на несколько групп, после чего определялось количество (N_i) капель каждой группы размеров r_i . При расчете параметров $N(n)$ и $N(v)$ использовались формулы (1), (2):

$$N(n) = N_i / \sum N_i \cdot 100\% \quad (1)$$

$$N(v) = V_i / V \cdot 100\% \quad (2)$$

где: N_i – количество капель каждой группы размеров; $\sum N_i$ – суммарное количество образовавшихся капель; $V_i = 4/3 \cdot \pi \cdot r_i^3 \cdot N_i$ – суммарный объем капель

^(*) И.С. Войтков, vojtkov12@mail.ru

каждой группы размеров, л; V – начальный объем жидкостного массива, л.

По результатам выполненной обработки данных построены зависимости $N(n)=f(r)$ и $N(v)=f(r)$, представленные на рис. 1.

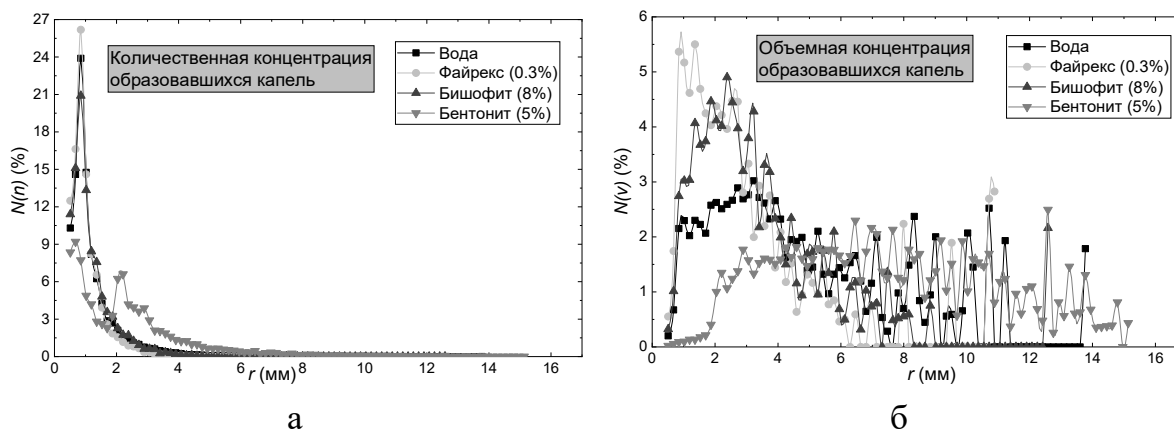


Рис. 1. Зависимости $N(n)=f(r)$ и $N(v)=f(r)$ для исследованных составов (объем массивов $V \approx 0,5$ л; пройденное расстояние – 10 м): а – количественная концентрация образовавшихся капель ($N(n)$); б – объемная концентрация образовавшихся капель ($N(v)$)

Полученные зависимости позволили определить минимальные и максимальные объемы отрывающихся одиночных капель и фрагментов жидкости в диапазоне от 1 мм до 15 мм. Установлено, что падение жидкостного массива с высоты более 10 м приводит к полному разрушению последнего. При этом размеры капельного облака, обрывающегося при разрушении массива, превышают его размеры в 12-15 раз.

Полученные результаты исследований могут быть применены при создании новых и модернизации существующих технологий распыления жидкостей, растворов и суспензий в энергетической и химической отраслях промышленности, а также в сфере пожаробезопасности.

Работа поддержана РФФ (грант № 18-19-00056).

ЛИТЕРАТУРА

1. Volkov R.S. Transformation of Solution and Suspension Masses during Their Free Fall in Air // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2017. V. 51. P. 1055-1062.
2. Girin O.G. Drop deformation and acceleration: the effects of inertia in fragmentation // Atomization and Sprays, 2014. V. 24. P. 349-366.
3. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion // Metrol. Measur. Sys, 2012. V. 19. № 4. P. 797.

R.S. Volkov, P.A. Strizhak, G.V. Kuznetsov, I.S. Voytkov
Tomsk Polytechnic University

TRANSFORMATION OF MASSIFES OF LIQUIDS AT THEIR FREE FALL

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА С ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛОЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

На современном этапе развития тепловой энергетики особое внимание уделяется экологическим параметрам работы топливосжигающих энергетических установок, поскольку выработка тепловой и электрической энергии с использованием органических топлив сопровождается выбросом в окружающую среду оксидов азота.

Данный фактор представляется наиболее негативным при факельном сжигании твердых топлив с организацией высокотемпературной зоны. Образование высокотемпературных зон в ядре горения происходит при сжигании топлив с использованием вихревых горелочных устройств с разделением воздуха на первичный и вторичный. Выбор горелочных устройств связан с теплотехническими свойствами углей и поэтому при организации сжигания низкорекреационных твердых топлив зачастую применяют вихревые горелки с осесимметричной закруткой потоков топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха. Одним из наиболее экономически целесообразных способов снижения данного негативного эффекта это применение многоканальных вихревых горелок.

В многоканальных вихревых горелках реализуется ступенчатое сжигание топлива в пределах факела горелки, что приводит к снижению генерации NO_x [1]. Но при этом возможно увеличение недожога топлива, увеличение длины факела, а также изменение протекания физико-химических процессов в топочном объеме, что может негативно отразиться на эффективности и надежности работы котельного агрегата, особенно при реконструкции.

В данной работе проведено численное исследование топочных процессов при сжигании экибастузского угля в топочной камере котельного агрегата БКЗ-420-140 с проектной компоновкой вихревых горелочных устройств, и с их заменой на многоканальные. На котельном агрегате установлено 12 горелочных устройств в один ярус встречно.

Математическое моделирование выполнено с использованием пакета прикладных программ ANSYS Fluent версии 12.1.

В процессе исследования получены высококачественные результаты математического моделирования, что свидетельствует о правильности подходов и примененных численных алгоритмов при разработке и оптимизации

^(*) А.В. Гиль, Andgil@tpu.ru

математической модели для численного анализа процессов переноса и горения твердых топлив в соосно закрученных потоках.

Анализируя результаты численного моделирования отмечено, что использование многоканальных вихревых низкоэмиссионных горелок действительно приводит к снижению температурного уровня в ядре горения и соответственно к снижению генерации оксидов азота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект No. 18-38-00775_мол_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Конструкции топочно-горелочных устройств для снижения оксидов азота и шлакования, сжигания низкорреакционных углей (обзор) // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: V науч.-практ. конф., Челябинск, 7-9 июня 2011. В 3 т. Т.3. - Челябинск, 2011. - С.72-89.

E.S. Vorontsova, A.V. Gil, O.M. Koksharev
National Research Tomsk Polytechnic University

NUMERICAL INVESTIGATION ON THE COMBUSTION PROCESS IN THE UTILITY BOILERS WITH SWIRL BURNERS

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ДЛЯ ПРОСТЫХ
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

Конденсация пара является ключом к мировому производству электроэнергии и чистой воды. Она есть неотъемлемой частью энергетического цикла, который обеспечивает функционирование 85% всех электрогенерирующих установок и около половины опреснительных машин во всем мире. Поэтому все, что повышает эффективность этого процесса, имеет огромное влияние на глобальное использование энергии. Исследования в этой области с целью разработки различных теплообменных аппаратов необходимы для создания качественно новых систем, которые имеют малые массогабаритные характеристики и которые обеспечивают быстроедействие, экономичность и эффективность их действия.

Механизм капельной конденсации является предметом для многих исследователей, начиная с первых работ Якоба (1930-х гг.). Кроме того, на протяжении последних лет возростал интерес в различных странах мира по многим направлениям исследования высокоинтенсивного процесса капельной конденсации. Сегодня ведутся работы в данной области во многих странах Европы, Азии, Северной Америки, включая аспекты промышленного применения. Трубные и пластинчатые теплообменные поверхности являются наиболее технологичными с точки зрения их использования в промышленности. Вместе с тем получили новое качественное значение материалы, обеспечивающие гидро- и лиофобность рабочих поверхностей с одновременной защитой их от коррозионно – эрозионных процессов [1].

При помощи лабораторных и полупромышленных экспериментальных стендов для простых теплообменных аппаратов был исследован процесс капельной конденсации на плоских и трубчатых как гладких, так и гофрированных металлических поверхностях. В процессе исследований проведены теплотехнические измерения с одновременной визуализацией при помощи фото и видеосъемки и математическим моделированием с использованием программного обеспечения Condensation CAD (Рис.1). Были исследованы металлические поверхности из медьсодержащих сплавов, легированной и углеродистой стали, алюминиевых сплавов и т.д. в составе простых теплообменных аппаратов – кожухотрубных и пластинчатых.

^(*) А.С. Гавриш, andrew_gavrish@ukr.net

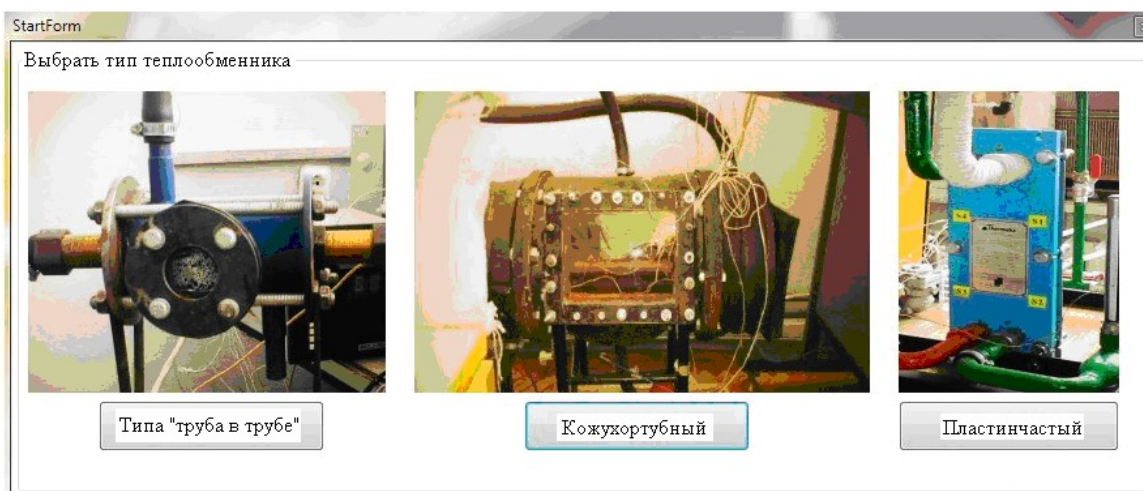


Рис. 1. Диалоговое окно программы Condensation CAD для расчета основных типов теплообменных аппаратов

Для образования современных «интеллектуальных» защитных гидрофобных покрытий по принципу третьего тела исследованы несколько десятков веществ, таких как Гидроэффект, Нанопротек, вещества полифторалкилдисульфидной группы и др. Стимуляторы капельной конденсации применялись как по отдельности, так и комплексно. Эксперименты на макро и микро уровне показали, что независимо от формы, свойств, размеров и ориентации теплообменной поверхности в пространстве, все процессы капельной конденсации подчиняются единым закономерностям. К их числу относят условный цикл конденсации для механизма процесса и кривые конденсации для закономерностей теплообмена [2]. Новый подход к защитным покрытиям должен решить проблему, связанную с необходимостью долговременного применения капельной конденсации в промышленных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение. // Успехи химии. 2008. 77 (7). С. 619-638.
2. Гавриш А.С. Об особенностях процесса конденсации на поверхностях теплообмена с различными краевыми углами смачивания // Тепловые процессы в технике (Thermal Process in Engineering). 2019. Т. 11. №2. С. 69–78.

A.S. Gavrish
National Technical University of Ukraine
“Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”

PECULARITIES OF PROCESS MECHANISM AND HEAT EXCHANGE REGULARITIES AT DROPWISE CONDENSATION FOR SIMPLE HEAT EXCHANGERS

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ГИДРОФОБНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Сушка гранул гидрофобных полимеров является сложным теплообменным процессом, в результате которого получается материал с требуемыми свойствами для стабильного процесса формования волокон, пленок или иных изделий. В работе рассмотрен процесс сушки гранулированных гидрофобных полимеров на примере полиэтилентерефталата (ПЭТФ).

В промышленных масштабах для сушки гидрофобных полимеров оптимальны шахтные сушилки с псевдооживленным слоем, в которых максимальную скорость движения осушающего агента необходимо ограничивать не только возможным выносом частиц, но и минимальной возможностью пылеобразования. Диапазон температуры осушающего агента также ограничен: температура должна быть достаточна для удаления внутренней влаги, но не превышать температуру липкости [1], чтобы всегда был возможен «выход» воды из ультрамикрочастиц. [2]

Сушка данного материала проходит в два этапа – удаление свободной влаги и глубокая сушка. Первый этап сушки происходит в период разогрева. Глубокая сушка происходит в два периода: период постоянной скорости сушки и период падающей скорости сушки. Исследование направлено на уточнение значений коэффициента теплоотдачи и его зависимости от скорости осушающего агента и порозности слоя в псевдооживленном слое.

Для решения данного вопроса были проведены эксперименты по гидродинамике взвешенного слоя для гранул с эквивалентными диаметрами 4,16 мм, 3,3 мм, 2,98 мм, для слоя гранулята высотой 0,15, 0,25, 0,35, 0,45 и 0,55 м. Расчетная часть по определению изменения порозности взвешенного слоя и расчету критерия Нуссельта для постоянного периода сушки выполнялись по предложенному алгоритму [4].

При удалении влаги в периоде постоянной скорости сушки безразмерный коэффициент теплообмена можно определить по формулам [3]:

$$Nu = 1.6 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{1.3} \cdot Pr^{0.33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} < 200 \quad (1)$$

$$Nu = 0,4 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0.67} \cdot Pr^{0.33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} > 200 \quad (2)$$

^(*) Ю.А. Геллер, YUL4@bk.ru

где ε – средняя порозность слоя, величина которой для интенсивного кипящего слоя составляет 0,55-0,7;

Re – число Рейнольдса (для потока воздуха);

\bar{d} – средний объемно-поверхностный размер частиц, м;

ν , α – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности газа при средней температуре.

Для определения числа Рейнольдса для потока воздуха используем формулу:

$$Re = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (3)$$

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{g\bar{d}_s(\bar{\rho}_m - \bar{\rho}_g)}{\bar{\nu}^2 \bar{\rho}_g} \quad (4)$$

В результате расчетов получены значения коэффициента теплоотдачи и его зависимости от скорости осушающего агента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00704.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Петухов Б.В. Полиэфирные волокна. – М.: Химия, 1976. – 272 с
2. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с
3. Акулич А.В., Гидродинамика шахтной сушки гранулированного полиэтилентерефталата / Акулич А.В., Геллер Ю.А. / Химические волокна. 2002. № 1. С. 37-40.
4. П.В. Акулич Расчеты сушильных и теплообменных установок// П.В. Акулич – Минск: Беларус.навука, 2010. – 443 с. – ISBN 978-985-08-1182-9.

Yu.A. Geller, I.S. Antanenkova, Yu.V. Shatskikh
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

RESEARCH OF AIR-FLUIDIZED LAYER IN THE DRYING PROCESS OF GRANULATED HYDROPHOBIC POLYMERS

**МЕХАНИЗМ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ
ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ БЕЗМАСЛЯНЫХ И МАСЛОПОЛНЕННЫХ
КРИОГЕЛЕЙ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ УГЛЯ**

В последнее время одной из актуальных задач промышленной теплоэнергетики является вовлечение низкосортных энергоресурсов (бурых углей, торфа, биомассы) в цикл производства тепловой энергии и электричества. Это связано, с одной стороны, с увеличением энергопотребления мировой экономикой, с другой стороны, с большими запасами низкосортных энергоресурсов, их доступностью и относительно невысокой стоимостью. Применение таких топлив в исходном состоянии на практике вместо широко распространенных углей энергетических марок невозможно в рамках существующих технологий сжигания твердого топлива. Перспективным направлением является разработка композиционных составов на их основе с добавлением (при необходимости) в небольшом количестве твердых или жидких компонентов для повышения энергетических и экологических характеристик, а также приготовление на их основе топливных брикетов, пеллет и гранул для сжигания слоевым методом.

В рамках данной работы приготовлены гетерогенные гелеобразные топлива на основе безмасляных и маслосодержащих криогелей, содержащих частицы угольной пыли дисперсностью не более 140 мкм: 90–50% масс. водный раствор ПВС (10% масс.) + 10–50% масс. уголь; 37,8% масс. водный раствор ПВС (10% масс.) + 30% масс. уголь + 32,2% масс. масло. Выполнен анализ физико-механических свойств топливных пеллет размерами 20 мм. Модули упругости и пределы прочности топливных пеллет разного компонентного состава изменялись в диапазонах 15–300 кПа и 400–2140 кПа, соответственно. В случае маслосодержащих криогелей с мелкодисперсными частицами угля модуль упругости топливных пеллет меньше в 8–10 раз по сравнению с аналогичной характеристикой для пеллет безмасляного криогеля с идентичной концентрацией угля. Предел прочности пеллет маслосодержащих криогелей выше в 2 раза предела прочности пеллет безмасляных криогелей, содержащих идентичное количество угольной пыли.

Экспериментально установлены механизмы зажигания группы составов гетерогенного гелеобразного топлива в высокотемпературной среде окислителя, а также исследовано влияние начальной температуры топлива на характеристики

^(*) Д.О. Глушков, dmitriyog@tpu.ru

зажигания. Инициирование процесса горения происходило в неподвижной воздушной среде при 600–1000 °С. Установлено, что при зажигании безмасляных и маслonaполненных гетерогенных криогелей в течение индукционного периода протекают разные совокупности физико-химических процессов. Зажигание первой группы составов гелеобразного топлива аналогично процессам зажигания частиц твердого натурального топлива. Многокомпонентность состав второй группы гелеобразного топлива является причиной микровзрывов, в результате которых сначала происходит зажигание частиц угля, движущихся и удаляющихся от поверхности исходного образца топлива на некоторое расстояние. Далее процесс экзотермического реагирования из этой зоны распространяется по всему объему горючей парогазовой смеси, сформировавшейся в течение индукционного периода в окрестности образца топлива и содержащей мелкодисперсные твердые горючие компоненты. Микровзрывы, сопровождающиеся диспергированием образца топлива, интенсифицируют как процесс зажигания, так и выгорания.

Для составов гелеобразных топлив на основе криогелей, содержащих совместно частицы угля и масло, характерны меньшие в 1.5–2 раза времена задержки зажигания (1–6 с против 2–12 с) по сравнению с составами на основе криогелей, содержащих только частицы угля, при прочих равных условиях. При изменении начальных температур топлива в диапазоне от минус 40 °С до минус 85 °С, при варьировании концентрации угля в диапазоне 10–50% в составе безмасляных криогелей и при разных способах приготовления маслonaполненных гетерогенных криогелей отличия значений времен задержки зажигания составляют 25–35%, 30–40%, 15%, соответственно. Аналогично маслonaполненным криогелям (без твердых компонентов) для гетерогенных составов с мелкодисперсными частицами угля, рассмотренных в данной работе, установлено, что времена задержки зажигания тем меньше, чем больше начальная температура образцов. При температурах минус 40 °С времена задержки зажигания безмасляных криогелей с углем больше на 15–25% чем при температурах образцов 20 °С. Менее существенное (не более 9%) отличие времен задержки зажигания характерно для составов маслonaполненных криогелей с углем. Гелеобразные топлива с меньшей начальной температурой зажигаются при более высоких (на 50–100 °С) температурах источника нагрева.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (номер гранта 18-13-00031).

D.O. Glushkov
National Research Tomsk Polytechnic University

**IGNITION MECHANISM AND CHARACTERISTICS
OF GEL FUELS BASED ON OIL-FREE AND OIL-FILLED CRYOGELS
WITH FINE COAL PARTICLES**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕВОДА УГОЛЬНЫХ ТЭС
НА КОМПОЗИЦИОННОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ
УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Одной из основных мировых экологических проблем является загрязнение окружающей среды промышленными и бытовыми отходами. Только на полигонах в России хранится более $94 \cdot 10^9$ тонн отходов. Их относительно высокий энергетический потенциал, ограниченность ресурсов полигонов, необходимость в улучшении экологической обстановки объясняют актуальность утилизации отходов путем сжигания в составе композиционных топлив (например, смесь мелкодисперсного угля, воды, отработанных промышленных масел, твердых бытовых отходов).

Для обоснования практической реализации стратегии совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем сжигания выполнено экспериментальное исследование процессов зажигания и горения 2-х мм одиночных капель для группы составов композиционного топлива на основе влажного отхода углеобогащения с добавлением в качестве горючих компонентов типичных твердых бытовых отходов: древесины, резины, пластика, картона, а также отработанного турбинного масла. Установлены области гарантированных времен задержки зажигания трех групп топливных композиций, отличающихся составом, в неподвижной воздушной среде при температурах 600–1000 °С. Минимальные значения времен задержки газофазного зажигания составляют 3 с, максимальные – 25 с. С помощью термопарных измерений установлены изменения температуры капли топлива в процессе горения. Максимальные значения температур достигают 1300 °С для составов с добавлением 10% отработанного масла. Температуры горения топливных составов без добавления масла на 200–300 °С ниже. Концентрации основных антропогенных выбросов (оксидов углерода, азота, серы) в составе дымовых газов не превышают аналогичные характеристики при сжигании сухого угля. Добавление отработанных масел в состав композиционных топлив, с одной стороны, влияет на снижение концентрации диоксинов и фуранов в дымовых газах при выгорании твердых бытовых отходов в составе топлива вследствие более высоких температур горения, с другой стороны, ведет к увеличению концентрации основных антропогенных выбросов. Но это ухудшение экологических характеристик не ведет к превышению предельных

^(*) Д.О. Глушков, dmitriyog@tpu.ru

выбросов загрязняющих веществ энергетических установок при сжигании твердого топлива.

На основании результатов экспериментального исследования разработаны основные положения стратегии совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив на примере трех промышленно развитых соседних регионов Российской Федерации (Кемеровская, Новосибирская, Томская области) с отличающимися уровнями социального развития и структурами промышленного производства. Эта стратегия предполагает перевод трех типичных угольных ТЭС (по одной в каждом регионе) на композиционное жидкое топливо. С одной стороны, это снизит негативное воздействие отходов на окружающую среду, с другой стороны, уменьшит потребление высококачественного угольного топлива для производства тепла и электричества. В течение 25 лет реализации разработанной стратегии экономия угля составит 145 млн. т, будет утилизировано 190–260 млн. т промышленных и бытовых отходов с выработкой $10,1 \cdot 10^9$ кВт·ч электричества и $9,7 \cdot 10^6$ Гкал тепловой энергии. Положительный экономический эффект с учетом модернизации систем топливоподачи на ТЭС и строительства единого центрального завода топливоприготовления составит от 5,7 до 6,9 млрд. долларов или 65–78%, соответственно, от основных затрат трех ТЭС в течение идентичного промежутка времени работы на угле.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-43-700001.

D.O. Glushkov, K.K. Paushkina, D.P. Shabardin
National Research Tomsk Polytechnic University

**PROSPECTS FOR THE TRANSFER OF COAL-FIRED TPPs TO
COMPOSITE FUEL FOR JOINT UTILIZATION OF INDUSTRIAL AND
MUNICIPAL WASTE**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
ГИДРОДИНАМИКИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ
И КИПЕНИИ ПЛЕНКИ, ОРОШАЮЩЕЙ ПУЧОК
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ**

Оребрение труб пакета является одним из основных способов интенсификации теплообмена в аппаратах пленочного типа. Оребрение приводит к существенной стабилизации пленочного течения и многократной интенсификации теплообмена. Число публикаций, где исследуется теплообмен при испарении и кипении пленки крайне ограничен.

В данном докладе представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики пленочных течений, орошающих пакеты горизонтальных труб, с различным расстоянием между ребрами. Показано, что определяющую роль в гидродинамике пленочных течений играют силы поверхностного натяжения, которые существенно превышают силы тяжести. Характерным линейным размером становится высота ребра, а само ребро находится в области начального участка теплового пограничного слоя.

Опыты показали, что каждое ребро в своей верхней части орошается ламинарной пленкой, стекающей с торца ребра во впадину. Нижняя часть ребра, находящаяся внутри впадины, орошается основным турбулентным потоком жидкости [1].

Корректно определить границу раздела между ламинарным и турбулентным потоками практически невозможно. Ее можно определить лишь оценочно, в первом приближении, при ряде допущений.

В работе представлены экспериментальные данные по теплообмену при испарении пленки фреона R-21, орошающей пучок оребренных труб. Опыты выполнены в институте теплофизики СО РАН группой исследователей с участием автора на стенде с вынужденной циркуляцией. В расчете на полную поверхность оребренной трубы теплообмен при испарении на пакете оребренных труб оказался заметно выше, чем теплообмен при кипении на пакете гладких оребренных труб при $q=idem$.

В серии опытов, опубликованных в [2], приведены результаты экспериментального исследования при испарении и кипении пленки, орошающей пучок гладких и оребренных труб фреоном R11. Интенсификация

^(*) И.И. Гогонин, gogonin@itp.nsc.ru

теплообмена на пакете оребренных труб, по сравнению с пакетом гладких, достигает 6 раз как при испарении, так и при развитом кипении.

В докладе изложен алгоритм расчета теплообмена при испарении и кипении. Толщина пленки в межреберной впадине вычисляется по [3]. Теплообмен при испарении на начальном участке теплового пограничного слоя по [4], а теплообмен при кипении по [5]. Данные расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гогонин И.И., Кабов О.А. Влияние капиллярного удерживания жидкости на теплообмен при конденсации на оребренных трубах. Известия СО АН СССР, сер. техн. наук 1983, вып.3 №8, с. 3-8.
2. Fujita J., Tsatsui M. Experimental and analytical study of evaporation heat transfer in falling films on horizontal tubes// Proc. of 10-th Jnt. Heat transfer Conference. 1994. Brighton №6.
3. Ducler A.E., Bergelin O.F. Characteristics of film in Falling Liquid, Chem. Enj.Progress 1952, V. 48, №11, p 357.
4. Rogers J. T. Laminar falling film flow and heat transfer characteristics on horizontal tubes. The Canadian Journal of Chem Eng 1981 V. 59, №2, p 213.
5. Гогонин И.И. зависимость теплообмена при кипении от свойств и геометрических параметров теплоотдающей стенки. Теплофизика высоких температур 2006, V. 44, №6, С.918.

I.I. Gogonin
Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF HYDRODYNAMICS ON HEAT TRANSFER AT EVAPORATION AND BOILING OF A FILM IRRIGATING A BUNDLE OF HORIZONTAL FINNED TUBES

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА В ЖИДКОЙ И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ СОСТОЯНИЙ

Высокая термодинамическая эффективность применения в качестве рабочих тел фторуглеродного состава (октафторпропана C_3F_8 , октафторциклобутана $c-C_4F_8$, декафторбутана C_4F_{10}) энергетических установок впервые была отмечена в работах Гохштейна Д.П. и соавторов [1] ещё в 60-ые годы прошлого века. Однако, расчеты циклов на данных веществах с приемлемой точностью могут быть выполнены только по результатам работ, выполненных на кафедре Теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» в последние 12 лет. Опытные данные по теплофизическим свойствам октафторциклобутана (RC318, $c-C_4F_8$) и расчетные модели (уравнения состояния), опубликованные ранее в доступных источниках, охватывали только диапазон параметров работы холодильных и теплонасосных установок. При повышенных температурах достоверные данные отсутствовали.

Настоящая работа является продолжением цикла исследований $p\rho T$ -поверхности и скорости звука рабочих веществ фторуглеродного состава в диапазоне параметров состояния работы энергетических установок. Несколько ранее были получены новые экспериментальные данные по плотности октафторциклобутана в диапазоне температур 20...450 °С и давлений до 11 МПа методом пьезометра постоянного объема. Погрешность опытных данных оценивалась не более 0,2%. Было также зафиксировано начало процесса полимеризации исследуемого вещества при температуре 470°С и давлении 10 МПа, т.е. опытным путем были установлены границы для применения RC318 в качестве рабочего вещества теплосиловых циклов [2]. Проведены были также измерения скорости звука в области жидкости и сверхкритических параметрах состояния в интервале температур 20...170 °С. Разработана и апробирована методика совместной обработки разнородных опытных данных для построения расчетных моделей [3]. Для оценки качества результатов измерений последней серии (в жидкой фазе), экспериментальные данные были описаны полиномиальным уравнением в виде $v(p, T)$:

$$v = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 b_{ij} p^i \tau^{-j} \quad (1)$$

где p – давление в МПа; $\tau = T/100$ – приведенная температура; b_{ij} – численные коэффициенты уравнения; v – удельный объем, м³/кг.

^(*) А.А. Сухих, SukhikhAA@mpei.ru

Описание полученного массива экспериментальных данных уравнением вида (1), расчет абсолютных и долевых отклонений был проведен в среде Wolfram Mathematica 8. В результате расчета по полученному уравнению среднеквадратическое отклонение описанных данных от массива экспериментальных не превысило $sk = 0,13\%$. Для сравнительной оценки новых опытных данных использовалась расчетная модель, построенная с помощью метода подобия, программы NIST (USA) [4]. Характер отклонений показан на рис.1. Максимальное отклонение экспериментальных значений от рассчитанных по [4] менее $0,44\%$, они имеют систематический характер. Для построения достоверного уравнения состояния желательны проведение дополнительных измерений (предполагается их представить к публикации в Journal of Physics).

Работа поддержана грантом РФФИ №17-08-00983.

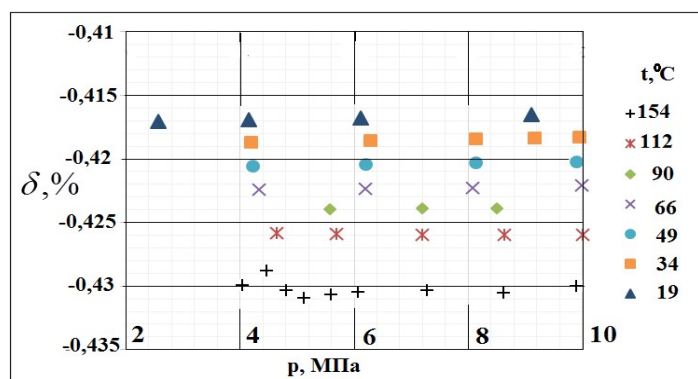


Рис. 1. Относительные отклонения полученных экспериментальных значений плотности с - C₄F₈ от рассчитанных по программе REFPROP 9.0

ЛИТЕРАТУРА

1. Гохштейн Д.П., Смирнов Г.Ф., Киров В.С. Некоторые особенности парогазовых схем с неводяными парами / Теплоэнергетика. 1966, №1, С. 20 – 24.
2. Гранченко П.П., Кузнецов К.И., Сухих А.А., Скородумов С.В. Экспериментальные измерения плотности октафторциклобутана в области параметров работы теплосиловых установок. / Энергосбережение и водоподготовка. 2018. №4 (96). с.53-9.
3. Кузнецов К.И., Сухих А.А., Гранченко П.П., Скородумов С.В. Расчет термодинамических функций по результатам совместных термических и акустических измерений. / XV Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ: Тезисы докладов, Москва, 15-17 октября 2018 г. М: Изд-во «Янус-К», 2018,- 200 с.
4. REFPROP 9.0: Reference Fluid Thermodynamic and Transport properties: Copyright 2010 by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the USA.

P.P. Granchenko, K.I. Kuznetsov, A.A. Sukhikh, S.V. Skorodumov
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

EXPERIMENTAL STUDY OF DENSITY OF OCTAFLUOROCYCLOBUTANE IN THE LIQUID AND SUPERCRITICAL AREA OF STATES

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОРРЕКЦИОННОГО ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ГТУ-ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАГЕНТОВ АМИНАТ

Исследование возможности применения коррекционного водно-химического режима рассмотрена на примере опытно-промышленных испытаний отечественных реагентов марки АМИНАТ производства компании ООО «НПФ Траверс».

Для организации водно-химического режима (ВХР) ПК и КУ ГТУ ТЭС на стадии проекта был выбран хеламинный ВХР с коррекцией рН котловой воды щелочью. В связи с подщелачиванием пермеата до значений рН=8,5-9,5 дозирование NaOH в котловую воду было исключено. Ввод комплексного аминоксодержащего реагента марки Helamin BWR-150H был организован в трубопровод питательной воды после деаэратора на всас питательных насосов. Контроль дозирования реагента Helamin BWR-150H осуществлялся по содержанию реагента в питательной и котловой воде, а также в насыщенном паре [1].

Принимая во внимание достоинства и недостатки хеламинных ВХР [2,3], а также руководствуясь программой импортозамещения, для проведения опытно-промышленных испытаний на паросиловом оборудовании ГТУ-ТЭС были предложены отечественные реагенты торговой марки АМИНАТ. Для организации коррекционного водно-химического режима паровых котлов и котлов-утилизаторов были поставлены реагенты АМИНАТ КО-4 на основе смеси полифосфатов для предотвращения накипеобразования на теплопередающих поверхностях и АМИНАТ ПК-2 на основе смеси нейтрализующих аминов для предотвращения углекислотной коррозии и поддержания нормируемых значений рН пароконденстаного тракта.

В соответствии с реакцией образования гидроксилпатита в процессе фосфатирования котловой воды в паровом котле и котле-утилизаторе рассчитано необходимое количество АМИНАТ КО-4, которое не изменялось на протяжении всего ОПИ. Доза АМИНАТ ПК-2, необходимая для полной нейтрализации углекислоты и коррекции значений рН паров и конденсата, рассчитывалась в зависимости от содержания углекислоты в паре и корректировалась в зависимости от значений рН паров и конденсата. ОПИ были проведены в три

* М.В. Бутакова, gaidukova@travers.su

этапа: 1 этап – поддержание значения рН паров и конденсата рН = 8,5; 2 этап – рН = 9,0; 3 этап – рН = 9,5.

В ходе опытно-промышленных испытаний (ОПИ) эффективность применения реагентов постоянно контролировалась и оценивалась на основании данных химического анализа питательной и котловой воды, насыщенного и перегретого пара. При этом главным условием в ходе проведения испытаний и корректировки доз реагентов было обеспечение норм качества теплоносителя парового котла и котла-утилизатора согласно требованиям утвержденных режимных карт. Контроль дозирования реагента АМИНАТ ПК-2 осуществлялся с помощью разработанной и сертифицированной методики (Свидетельство №205-01/RA.RU.311787-2016/2018).

В результате проведенной работы было отмечено, что коррекционный водно-химический режим парового котла и котла-утилизатора ГТУ ТЭС, организованный с использованием реагентов АМИНАТ, обеспечил поддержание нормативных требований режимных карт оборудования, а также минимизацию процессов коррозии, накипеобразования и шламообразования в течение всего периода ОПИ. Также на основании эксплуатационных данных были рассчитаны годовые потребности в реагентах АМИНАТ ПК-2 и АМИНАТ КО-4 на максимальную и номинальную паропроизводительность котлов. При сопоставимых расходах реагентов Helamin и АМИНАТ затраты на приобретение реагентов АМИНАТ значительно ниже в связи с производством на территории РФ, поэтому использование отечественных реагентов позволит существенно сократить годовые расходы на закупку реагентов и, как следствие, повысить экономическую эффективность производственной деятельности заказчика.

Работа поддержана грантом 13.9600.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 153-34.1-37.534-2002. Временный регламент по коррекционной обработке хеламином теплоносителя котлов давлением 2,4 - 13,8 МПа (хеламинный водно-химический режим).
2. Богачев А.Ф. Хеламинный водно-химический режим котлов-утилизаторов парогазовых установок // Электрические станции, - 2006. -№7, -С. 33-36.
3. Б.М. Ларин. Состояние водно-химического режима и систем его обеспечения на энергоблоках ПГУ (обзор) // ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2018, № 1, с. 47–53, DOI: 10.1134/S0040363617120050.

O.V. Guseva¹, M.V. Butakova^{1,2}, K.A. Orlov², D.V. Gubin¹

¹Scientific and Production Company «Travers», Russia,

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

THE EXPERIENCE OF IMPLEMENTING THE WATER CHEMISTRY TREATMENT ON THE GAS-TURBINE POWER PLANT USING THE AMINAT REAGENTS

И.А. Давлетшин^{1, 2, (*)}, Р.Р. Шакиров¹, А.А. Паерелий¹
¹Институт энергетики и перспективных технологий
 ФИЦ Казанский научный центр РАН,
²Казанский национальный исследовательский
 технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПОТОКА В ДИФФУЗОРЕ

Течения в диффузорных каналах вызывают интерес, в том числе и в связи с возможностью появления отрывных явлений. Такие потоки нежелательны с точки зрения роста гидравлических потерь [1]. В целом гидродинамические и тепловые процессы [2] в потоках с градиентом давления являются довольно сложными и получение достоверных экспериментальных данных в этой области можно считать актуальной задачей современной теплофизики.

В данной работе проведено исследование теплоотдачи на стенке плоского диффузора при различных степенях турбулизации рабочего потока (воздуха). Рабочий участок экспериментальной установки представлял собой плоский канал шириной 150 мм и длиной 1,2 м с диффузорным участком 3 в центре (рис. 1). Во входном сечении канала устанавливались различные турбулизаторы потока 5 (гладкий канал; абразивная шероховатость; абразив и сетка; абразив и сетка с флажками). Исследовались течения в диффузоре длиной $L=450$ мм с углом раскрытия $\varphi=5^0$. Высота участка перед и за диффузором составляли $h_{вх}=63$ мм $h_{вых}=100$ мм.

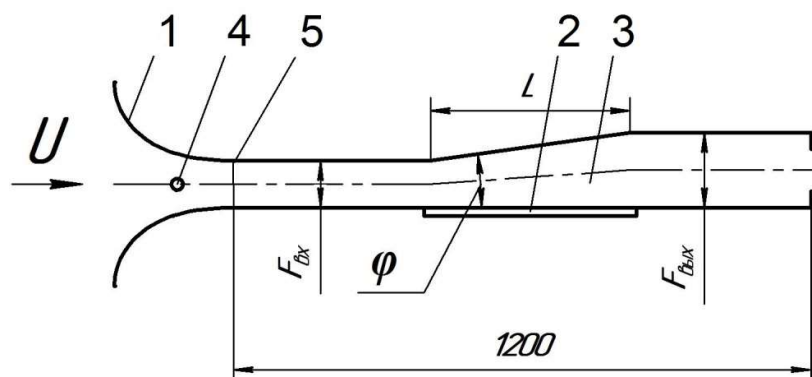


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – входное устройство; 2 – теплообменная стенка; 3 – диффузорный участок; 4 – термометр; 5 – турбулизатор

По результатам экспериментов были получены распределения коэффициента теплоотдачи по длине диффузора (рис. 2). Штриховыми линиями показаны границы диффузорного участка. Немонотонные распределения

(*) И.А. Давлетшин, davlet60@mail.ru

коэффициента теплоотдачи в гладком канале следует отнести в данном случае к действию двух факторов: первое, на входе развивался начальный участок с падающим характером распределения теплоотдачи. Второе, ламинарно-турбулентный переход приводил к росту теплоотдачи. В дальнейшем возобновлялось умеренное падение коэффициента теплоотдачи, связанное с падением скорости потока.

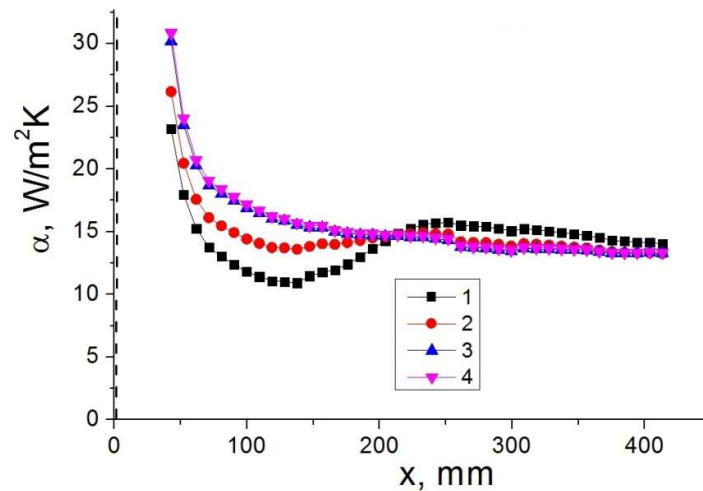


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи: 1 – гладкий канал; 2 – абразив на стенке; 3 – абразив и сетка; 4 – абразив, сетка и флажки

Установка турбулизатора потока в виде абразива на стенке приводила к интенсификации теплоотдачи на начальном участке диффузора. Более сильная турбулизация приводила к еще большей интенсификации теплоотдачи. При этом распределения становились уже монотонными. Теплоотдача во второй половине диффузора показала примерно одинаковые распределения во всех вариантах турбулизации потока. Полученные данные по теплоотдаче согласуются с гидродинамической картиной течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00889).

ЛИТЕРАТУРА

1. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. М.: «Энергия», 1970. 384 с.
2. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Решмин А.И. Теплообмен в конических расширяющихся каналах // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 287-293.

I.A. Davletshin^{1,2}, R.R. Shakirov¹, A.A. Paerelij¹
¹IPEAT FRC Kazan Scientific Center of RAS,
²Kazan National Research Technical University

HEAT TRANSFER IN TURBULIZED FLOW IN DIVERGING CHANNEL

**ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ
КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТИПА**

Центробежный компрессор представляет собой машину динамического действия. Ступени центробежного компрессора различаются между собой значениями развиваемого давления и производительности и, соответственно, различным характером турбулентных течений в проточной части. Основным элементом ступени, передающим механическую энергию от привода газу, является рабочее колесо с лопатками. Характер течения в межлопаточных каналах рабочего колеса – турбулентный, осложненный вращением и поворотом потока на 90 градусов. Современные программные средства вычислительной гидрогазодинамики предлагают инструментарий для решения широкого класса турбулентных течений. Перед использованием для промышленного назначения численные модели типовых ступеней должны проходить этап верификации. Степень достоверности определяется на этапе валидации с сопоставлением с экспериментальными данными.

В работе использована модельная ступень промежуточного типа [1] с расчетным значением условного коэффициента расхода $\Phi_p=0.064$ и коэффициента теоретического напора $\psi_T=0.5$. Ступень состоит из 5 элементов: осевой патрубков, рабочее колесо, безлопаточный диффузор, обратно-направляющий аппарат, спрямляющий конфузор, междисковый зазор и лабиринтные уплотнения у основного и покрывающего дисков рабочего колеса. Целью работы является проведение тестирования численной модели с сопоставлением результатов с экспериментом.

В ходе исследования сеточной независимости решения были получены две расчетные сетки со средним числом элементов $N \sim 4.5$ млн. Для тестирования численной модели использованы как высокорейнольдсовые (y^+ выдержан в пределах 50) и низкорейнольдсовые (y^+ выдержан в пределах 2) модели турбулентности. Для калибровки модели турбулентности выбрана наиболее популярная модель SST (Shear Stress Transport – Модель сдвигового напряжения). В ходе предварительных расчетов выявлен наиболее влияющий на расчет эмпирический коэффициент β^* (β' – в некоторых изданиях). По умолчанию он задан $\beta^*=0.09$.

На рисунке 1 (слева) изображен коэффициент потерь рабочего колеса ζ^* в зависимости от условного коэффициента расхода для значений эмпирического коэффициента β^* от 0.09 до 0.02. На рисунке 1 (справа) изображены

^(*) А.М. Данилишин, danilishin_am@spbstu.ru

газодинамические характеристики, выраженные политропным коэффициентом полезного действия по полным параметрам и коэффициентом внутреннего напора в зависимости от условного коэффициента расхода для калиброванной численной модели, модели по умолчанию в сравнении с экспериментальными характеристиками.

В результате работы получено, что при должной настройке численной модели ступени центробежного компрессора можно получить удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными и использовать для моделирования подобных ступеней.

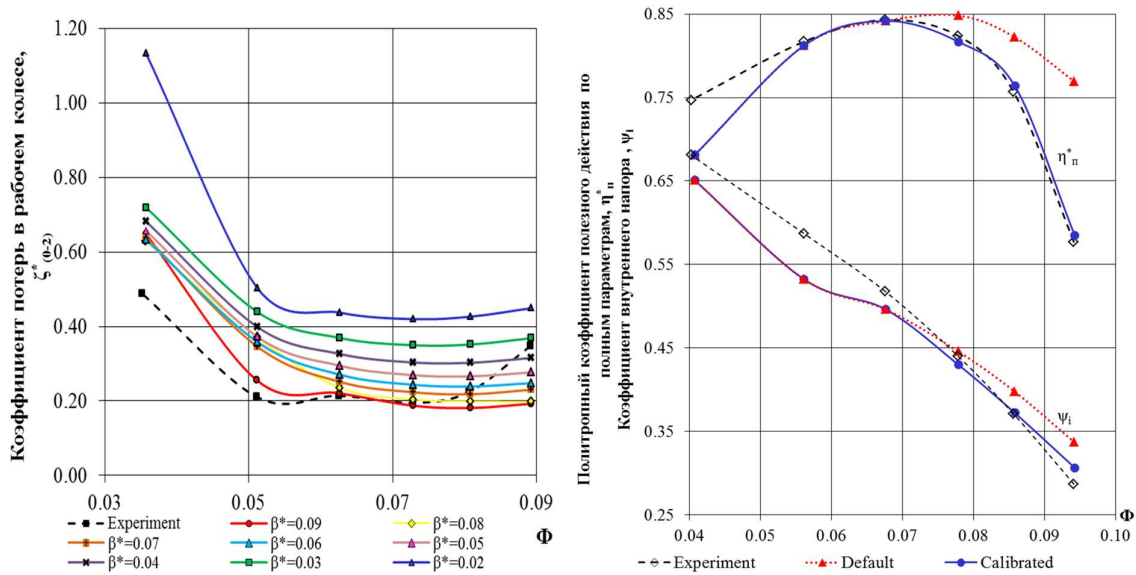


Рис. 1. Коэффициент потерь рабочего колеса в зависимости от условного коэффициента расхода для различных значений эмпирического коэффициента β^* (слева); Экспериментальные, калиброванные и рассчитанные по умолчанию газодинамические характеристики ступени (справа)

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Б. Галеркин. Экспериментальные исследования и развитие методов проектирования, основанных на анализе пространственного потока. С. 188 – 210. / Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ. Под ред. проф. Ю.Б. Галеркина. – Изд. СПбГПУ, СПб., 2010 - 670 с.

A.M. Danilishin, Y.V. Kozhukhov, A.A. Aksenov
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

NUMERICAL MODEL TESTING FOR AN INTERMEDIATE TYPE CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПУЧКЕ ТРУБ КАПЛЕВИДНОЙ ФОРМЫ

В энергоустановках работающих по «органическому» циклу Ренкина (ОЦР), одним из основных теплообменных аппаратов является разделительный теплообменник. В качестве разделительного теплообменника могут применяться трубные пучки, наружная поверхность трубок омывается горячей (газовой) средой, а внутри труб протекает теплоноситель ОЦР. В работе проводится численное исследование теплообмена и гидродинамики шахматного пучка из 22 каплевидных труб с продольным и поперечным шагом 37 мм, и оценивается влияние деформации, вызванной перепадом давления внутри и снаружи труб. Геометрические характеристики поперечного сечения каплевидной трубы длиной 305 мм представлены на рис.1.

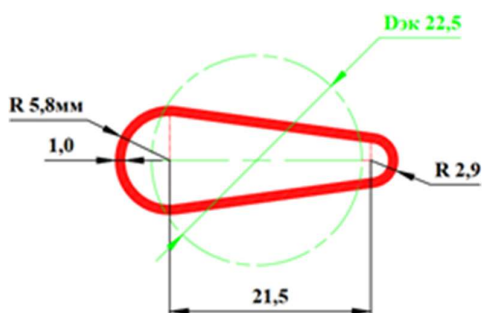


Рис. 1. Поперечное сечение каплевидной трубы

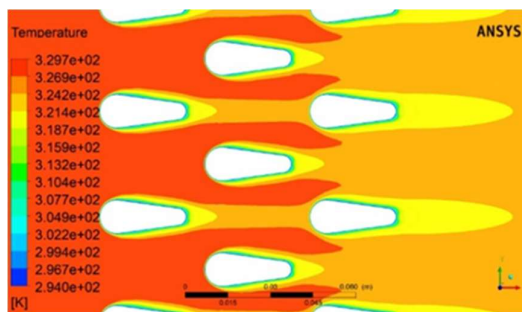


Рис. 2. Поле температуры в пучке с трубами «под нагрузкой»

Разработана математическая и численная модель для расчета теплообмена и гидродинамики пучка каплевидных труб с учетом напряжённо-деформированного состояния с помощью пакета ANSYS. Сравнение результатов, полученных в работе [1] (деформация не учитывалась) экспериментально и численно для диапазона скоростей 1 – 8 м/с, с результатами, полученными с помощью программы ANSYS, показало хорошее совпадение, что позволяет применять разработанную численную модель для расчета состояний подобных систем. Численно исследованы распределения скорости, давления, температуры и коэффициента теплоотдачи в пучке в актуальном диапазоне режимных параметров. На рис.2 представлены результаты расчета обтекания пучка потоком воздуха со скоростью 1,33 м/с, при числе Рейнольдса $1,8 \times 10^3$.

^(*) Дееб Равад, e.rawad.deeb@yandex.com

В схемах утилизации теплоты уходящих газов газотурбинных и парогазовых установок необходимо учитывать лучистые потоки теплоты. Сложность определения потоков излучения в системах труб обусловлена их каплевидной формой. Для определения потоков неоднородного излучения уходящих с этих поверхностей и потоков излучения, падающих на эти поверхности необходимо производить разбиение каждой поверхности системы на элементарные поверхности, имеющие такой минимально необходимый размер, что потоки излучения с них (на них) можно считать равномерными. Рассматриваются системы, состоящие из четырех тел, два из которых являются выбранными элементарными площадками, а остальные две поверхности являются «замыкающими» этой системы. В настоящей работе использован метод Поляка [2] для однородных потоков, примененный для элементарных систем. Определяются элементарные угловые коэффициенты излучения «методом длины натянутых нитей», реализованном в среде Mathcad. Достаточно сложная логика при вычислении формы и длины натянутой нити, состоящей из прямых и криволинейных элементов, потребовала при программировании применения векторной и булевой алгебры, решения системы векторных уравнений. Определялись вектора: точек крепления нити, из одной точки крепления до другой, направленные из точек крепления нити, перпендикулярно соответствующим элементарным площадкам (на которых находятся точки крепления нити). Находились характерные параметры, определяющие вид натянутой нити (характерные углы и длины), длины составных частей натянутой нити (прямолинейных и криволинейных участков).

В работе приведены расчеты в среде Mathcad радиационного теплообмена в системах круглых и каплевидных труб: определены результирующие потоки излучения на основе численной методики расчета элементарных, локальных, средних угловых коэффициентов излучения.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-08-01343-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sayed E.S.A., Emad Z.I., Osama M.M., Mohamed A.A. Heat transfer characteristics of staggered wing-shaped tubes bundle at different angles of attack // Heat and Mass Transfer. Vol. 50, no. 8, pp. 1091–1102, 2014.
2. Поляк Г.Л. Алгебра однородных потоков: АН СССР, Известия энергетического инст. им. Г.М.Кржижановского.,1935, Т.3, стр.53-74.

Deeb Rawad, D.V.Sidenkov, E.V. Yezhov, V.V. Ponurovskaya
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

CALCULATION OF HEAT EXCHANGE BY RADIATION FOR STAGGERED WING-SHAPED TUBES BUNDLE

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Красноярск является крупнейшим промышленным центром Сибири. Крупные промышленные предприятия, тепловые угольные электростанции стабильный рост автомобилизации экономики и населения оказывают сильное негативное влияние на общую экологическую обстановку г. Красноярска. Специфическая особенность г. Красноярска заключается в его географическом расположении, город находится в котловине Восточных Саян и на всем его протяжении протекает незамерзающая зимой река Енисей. В результате значительной разницы температур между незамерзающей рекой и окружающим пространством происходит локальная интенсификация движения воздушных масс, что, в свою очередь, способствует накоплению вредных выбросов в приземном слое атмосферы и приводит к формированию режима «черное небо» [1]. Согласно данным ФГБУ «Среднесибирское УГСМ» в Красноярске уровень загрязнения атмосферного воздуха характеризуется как «очень высокий» [2]. Следовательно, возникают проблемы связанные с обеспечением комфортного уровня жизнедеятельности населения. Только понимание механизмов физико-химических процессов протекающих в атмосфере с учетом различных метеорологических условий, позволит решить эту проблемы на основе прогнозирования и управления качеством воздуха в городе.

В настоящее время, выполняется работа по реализации предложенной модели в программном комплексе SigmaFlow [3]. Комплекс SigmaFlow создан и развивается в Красноярском филиале ИТ СО РАН и на кафедре теплофизики СФУ, он предназначен для исследования широкого класса гидродинамических и теплофизических процессов, позволяет выполнять параллельные вычисления на современных многоядерных процессорах и кластерных системах. В программном комплексе реализованы современные модели турбулентности, переноса мелкодисперсных инерционных частиц и химического реагирования.

Для адаптации модели динамики атмосферы над городом Красноярском планируется использовать данные натуральных наблюдений. В настоящей работе рассматривается влияние незамерзающей реки Енисей на движение воздушных масс в зимний период. Вначале было выполнено моделирование движения

(*) В. Д. Мешкова, Redel-VD@yandex.ru

воздушного потока при разной интенсивности ветра без учета теплообмена и движения реки. При этом на структуру потока влияет только ортографический фактор. Далее - рассмотрено влияние течения реки без учета теплообмена. Для этих вариантов не учитывалась естественная конвекция, предполагалось, что плотность воздуха постоянна. На следующем этапе учитывался теплообмен. Температура подстилающей поверхности и набегающего потока задавалась 20°C, температура реки 4°C.

Первые полученные результаты демонстрируют возможность оперативно моделировать динамику атмосферы города, с учетом неоднородного характера рельефа, окружающей среды и теплообмена. Дальнейшие систематические исследования позволят понять механизмы переноса, изучить особенности формирования локальных атмосферных циркуляций и накопления вредных примесей в атмосфере города.

Работа выполнена при финансовой поддержке: «Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта №18-41-242006: «Разработка математической модели, анализ и прогнозирование динамики распространения загрязняющих газовых и дисперсных примесей в атмосфере г. Красноярска»

ЛИТЕРАТУРА

1. Hrebtov N., Hanjaloic K. Numerical Study of Winter Diurnal Convection Over the City of Krasnoyarsk: Effects of Non-freezing River Undulating Fog and Steam Devils. Volume 163, pp. 469-495. June 2017.
2. <http://meteo.krasnoyarsk.ru/> Федеральное государственное бюджетное учреждение «(ФГБУ «Среднесибирское УГСМ»».
3. Хребтов М.Ю., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Тэпфер Е.С. Разработка математической модели динамики атмосферы и распространения вредных выбросов над г. Красноярском. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2017, 10(8), 1000-1006.

A.A. Dekterev^{1,2}, S.A. Filimonov^{1,2}, V.D. Meshkova²,
K.Yu. Litvintsev¹, A.A. Gavrilov^{1,2}, A.V. Shebelev^{1,2}
¹Institute of Thermophysics SB RAS,
²Siberian Federal University

NUMERICAL MODELING DYNAMICS OF ATMOSPHERE OF KRASNOYARSK IN VARIOUS METEOROLOGICAL CONDITIONS

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ
УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ
ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦ**

Во многих технических приложениях, например, камеры сгорания авиационных двигателей, тепловые энергетические станции, каталитические химические реакторы и в природных явления, например, лесные пожары встречаются дисперсные системы химически реагирующих частиц в условиях существенных случайных флуктуаций температуры, концентрации реагентов, скорости потока. По сравнению с детерминированным значением параметров наличие флуктуаций характеристик среды вносит принципиально новые эффекты в физику процессов горения и теплового взрыва.

Детерминированная теория горения разработана достаточно полно. В связи с широким использованием турбулентных реагирующих течений возникает проблема учета влияния флуктуаций скорости потока, концентраций реагентов и температуры на интенсивность химических экзотермических реакций. В случае гомогенного горения разработаны различные модели турбулентного смешения газообразных реагентов. В то же время вопрос о влиянии флуктуаций температуры на скорость химических превращений исследован недостаточно. В модели химической реакции Аррениуса скорость реакции экспоненциальным образом зависит от температуры. Поэтому следует ожидать существенного влияния флуктуаций температуры среды на интенсивность химических превращений.

В детерминированной теории горения и взрыва условия теплового взрыва определяются критической температурой, величина которой зависит от геометрии объекта и химической кинетики. Существенная зависимость скорости химической реакции от температуры и экстремальные свойства случайных процессов приводят к принципиально новым эффектам, изучение которых представляет интерес с научной и практической точек зрения.

В работе рассматривается влияние флуктуаций температуры и концентрации реагента в среде на тепловую стабильность одиночных частиц с гетерогенными химическими реакциями, проходящими на внутренней пористой поверхности частиц. Рассматриваются флуктуации, моделируемые случайными процессами с внутренней временной структурой (цветной шум).

Описание влияния случайных коррелированных флуктуаций температуры среды и концентрации реагента в среде на скорость гетерогенных химических

^(*) И.В. Деревич, DerevichIgor@bmstu.ru

реакций внутри пористой частицы базируется на математическом аппарате функции плотности вероятности. Для достаточно мелких частиц, когда частицу можно считать однородно прогретой и пренебречь диффузионным сопротивлением в объеме высокопористой частицы, получено замкнутое уравнение для функции плотности вероятности (ФПВ) средней температуры и концентрации реагента внутри частицы. Вследствие существенной нелинейности в зависимости скорости химической реакции от температуры и концентрации замыкание уравнения для ФПВ представляет нетривиальную задачу. В работе разработана методика исследования замкнутого уравнения для ФПВ на основе разностных методов и прямого численного моделирования путем современных подходов к решению систем стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ).

Корректность замыкания уравнения для ФПВ иллюстрируется путем сопоставления динамики изменения ФПВ, рассчитанной аналитическим путем с численными решениями и методом прямого численного моделирования.

Иллюстрируется влияние флуктуаций температуры и концентрации реагента в среде на границы возникновения теплового взрыва.

Представлен оригинальный подход по моделированию развития теплового взрыва внутри гранулы с учетом неоднородности распределения концентрации и температуры в объеме гранулы на основе современных методов теории случайных процессов. В этом случае система уравнений баланса энергии и концентрации с учетом нелинейных слагаемых, связанных с экзотермическими химическими реакциями, записывается на основе «метода прямых». Этот метод позволяет получить систему связанных нестационарных СОДУ с случайными источниками на границе. Путем прямого численного моделирования исследовано влияние диффузионного сопротивления внутри частицы, дисперсий флуктуаций температуры и концентрации реагента в среде на границы возникновения теплового взрыва.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта № 17-08-00376).

I.V. Derevich, A.K. Klochkov
Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow

**SIMULATION OF THERMAL EXPLOSION ON THE BASE OF SOLUTION
THE EQUATION FOR THE PROBABILITY DENSITY FUNCTION
OF PARTICLE TEMPERATURE FLUCTUATIONS**

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПАРА ГРАФЕНОВЫМИ НАНОСЛОЯМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛООВОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ

Эффективность преобразования излучения в системах солнечной теплоэнергетики в значительной степени связана с морфологией поверхностей поглощения и выбором рабочих жидкостей [1,2]. В последние годы в качестве рабочих используются наножидкости: базовая жидкость представляет собой известные теплоносители (вода, этилен-гликоль и т.п.); наноразмерные наполнители - углеродные (фуллерены, нанотрубки, наноалмаз, графен и его производные), керамические, а также наночастицы, в основном благородных металлов (золото, серебро, платина), имеющие сильные наноплазмонные эффекты нагрева. Другой метод – поверхностный нагрев слоя наноматериала с генерацией пара за счет сильного поглощения излучения и капиллярного течения воды.

В данной работе проведен анализ теплофизических процессов при нагреве графеновых слоев на подложке солнечным излучением теплового спектра. В качестве подложек были использованы перфорированные алюминиевые пленки и тонкие слои дерева с нанесенным слоем графеновых хлопьев. Общая схема установки и вариант подложки для поверхностного испарения показаны на рис.1.



Рис. 1. Общая схема установки и вариант подложки для поверхностного испарения

Графеновые хлопья (толщина от 3 до 5 нм, латеральный размер – 15-30 мкм) были нанесены на различные поверхности, которые исследовались по эффективности генерации пара с применением имитатора солнечного излучения

^(*) А.С. Дмитриев, asdmitriev@mail.ru

фирмы NPH (модель HQE). На рис.2 показаны кривые скоростей испарения на алюминиевой подложке без графенового слоя и в его присутствии.

Помимо описанного выше, были рассмотрены различные варианты пористых материалов, методы нанесения графенового слоя, геометрические параметры исходных образцов и т.д. В частности, выбран ольховый диск диаметром 8 см, толщиной 1 см с нанесенным «мокрым» способом графеновым слоем. Проведено изучение скорости испарения с применением специального устройства конденсации испаренного пара и показано, что такой способ дает весьма хорошие результаты для эффективности генерации пара.

В целом, в рамках настоящей работы показано, что поверхностная генерация под действием тепловой части солнечного излучения достаточно эффективной, что имеет важное значение, как в новых направлениях солнечной теплоэнергетики, так и для получения чистой или обессоленной воды.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант №17-19-01757).

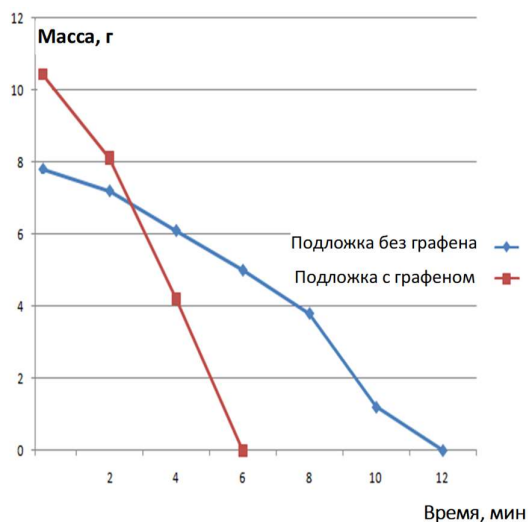


Рис. 2. Скорость испарения воды на подложках

ЛИТЕРАТУРА

1. Z. Deng et al. An emergence of solar thermal utilization: solar-driven steam generation. *J. Mater. Chem.* 2017. V. 17. 7691-7709.
2. K. Leong, et al. An overview on current application of nanofluids in solar thermal collector and its challenges// *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. 531092-1105.

A.S. Dmitriev, N.F. Ivlev
National Research University «MPEI»

FEATURES OF SURFACE VAPOR GENERATION BY GRAPHENE NANO-LAYERS UNDER THE INFLUENCE OF THERMAL RADIATION

**ОСОБЕННОСТИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ КАПЕЛЬ ГРАФЕНОВЫХ
НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ПОДЛОЖКАХ РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИИ**

В данной работе приведены экспериментальные результаты особенностей замораживания капель наножидкостей вода + графеновые нанохлопья (GNF) на подложках из различных материалов. Особое внимание уделено ориентации подложек, влиянию углов наклона и объемной концентрации GNF на формирование морфологии.

В настоящее время интерес к фазовым превращениям в наножидкостях возрастает из-за возможностей их применения для формирования различных морфологических структур, в технологиях быстрого нанесения информации на носители, создания противообледенительных систем, а также для улучшения, например, качества льда на спортивных мероприятиях. Ранее исследования проводились на горизонтальных поверхностях с лежащими на них каплями (например, [1]).

В экспериментах капли нанокolloидные растворы вода+графеновые нанохлопья различной концентрации замораживались на охлаждаемой сухим льдом алюминиевой подложке и с помощью измерительной системы Easy Drop компании Kruss проводились измерения контактных углов, формы и морфологии капель в процессе замораживания. Пример одного из вариантов данного процесса (от начального состояния до конечного, с образованием дендритных структур с GNF) представлен на рис.1 (капля висит на подложке; 50% - вода, 50% - GNF; время полного замораживания – 17 сек).

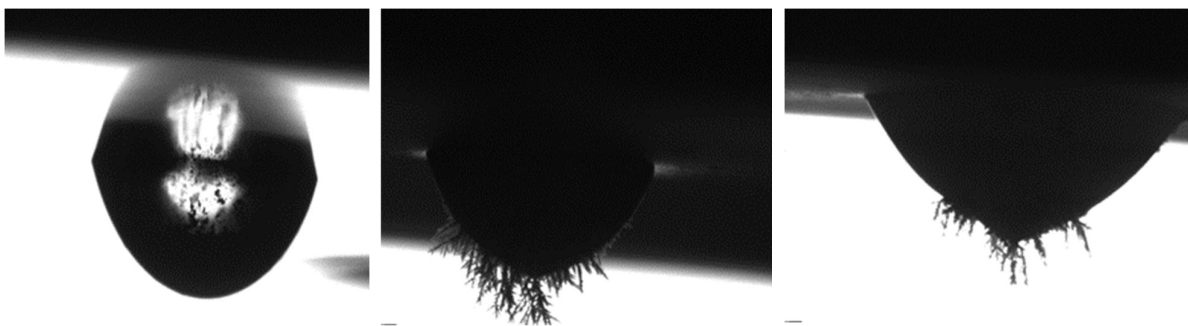


Рис. 1. Морфология замороженных капель

В ходе работы проводились исследования свойств замороженных капель воды с добавлением GNF графена и соли NaCl различной концентрации при помощи 5 растворов: дистиллированной воды, раствора (90% воды, 10% GNF

^(*) А.С. Дмитриев, asdmitriev@mail.ru

/NaCl), раствора (80% воды, 20% GNF /NaCl), раствора (70% воды, 30% GNF /NaCl), раствора (50% воды, 50% GNF/NaCl). В результате проведенных опытов удалось экспериментально установить, что при увеличении концентрации GNF в воде, время замораживания капли заметно сокращается, что связано с большей теплопроводностью наножидкости с GNF. При увеличении концентрации NaCl время замораживания существенно увеличивается. Изучение морфология капли для всех растворов выявили следующие факты: все капли образцов с раствором GNF после полного замораживания образовывали на вершине остроконечный конус. Практически на всех каплях разных растворов и концентраций веществ в них образовывались дендритные кристаллы. Можно было наблюдать образование дендритов на вершине капли. Следует отметить, что образование дендритных кристаллов было более бурным у капель, подвешенных на горизонтальной поверхности, т.к. под действием сил тяжести хлопья графена двигались от основания капли к её вершине. Было измерено время таяния капли как функция концентрации GNF – рис.2. Видно, что от концентрации эта величина зависит весьма сильно.

В настоящее время исследуются электрофизические и тепловые свойства образованных после замораживания структур, кинетика замораживание и влияние на него различных наноконцент, а также замораживание капель других наножидкостей.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-19-01757).

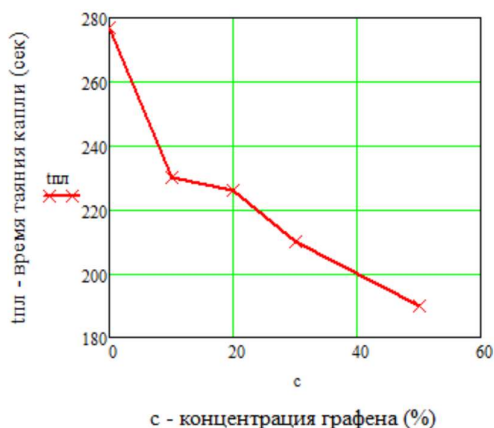


Рис.2. Зависимость времени таяния капли от концентрации GNF

ЛИТЕРАТУРА

1. Marín A., O. Enríquez R, P. Brunet et al. Universality of Tip Singularity Formation in Freezing Water Drops. Physical Review Letters/ 2014, 113 (5): 054301.

A.S. Dmitriev, N.E. Kluev
National Research University «MPEI»

FREEZING GRAPHENE NANOFUID DROPS ON COLD SUBSTRATES OF VARIOUS MORPHOLOGY

ИНДИКАТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВОБОДНОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТРУБОЙ

Двигатель с пульсационной трубой (ДПТ) внешнего подвода теплоты является в конструктивном плане более простым устройством по сравнению с широко известными двигателями Стирлинга. В связи с этим его использование в составе электрогенерирующей установки представляется весьма целесообразным. В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследований разработанного опытного образца ДПТ со свободным поршнем.

Общая схема конструкции ДПТ (рис. 1) включает в себя тепловую буферную трубку (пульсационную трубу), на концах которой находятся горячий и холодный теплообменники. Температурный градиент на регенераторе обеспечивается горячим и холодным теплообменниками, расположенными на его концах. При этом в ДПТ отсутствуют механизмы, отвечающие за регулирование процессов сжатия-расширения газа, аналогичные Стирлингу. За счет особенностей процессов газодинамики и теплообмена в ДПТ имеет место саморегулирование колебаний давления и объемной скорости с фазовой задержкой, позволяющей получать полезную работу.

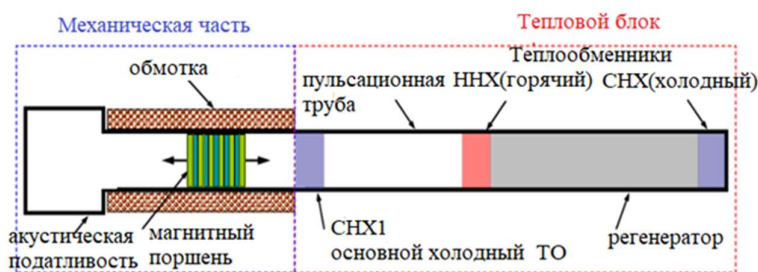


Рис. 1. Схема двигателя с пульсационной трубой

Принцип работы ДПТ в полной мере не выяснен, в связи с этим можно выделить следующие основные группы подходов: методики на основе термодинамики переменной массы газа и эмпирических параметров фазовой задержки и подвода тепла [1]; способы расчета, основанные на том, что внутренний необратимый термодинамический цикл в ДПТ аналогичен термоакустическим двигателям на стоячей волне, что доказано в [2]; методики, представляющие комбинацию первых двух, аналогичные применяемым к

^(*) С.О. Некрасова, yhoji@yandex.ru

пульсационным охладителям [3]. Целью данного исследования было сравнение результатов теоретического подхода расчета свободнопоршневого ДПТ на основе линейной термоакустики с экспериментальными данными.

В данной работе теоретическое моделирование ДПТ выполнено на основе уравнений линейной термоакустики с помощью программы Delta ES (LosAlamos, USA). При предварительной оценке конструктивных параметров теплообменников учитывались рекомендации по значениям коэффициентов теплоотдачи при осциллирующем движении газа [4]. Результатом теоретического расчета является получение уточненных конструктивных размеров ДПТ, а также значений резонансной частоты двигателя в свободнопоршневой компоновке, уровней необходимых значений подводимой и отводимой теплоты, индикаторной работы цикла. На основе этих данных экспериментально определены режимно-параметрические условия запуска ДПТ, проведено индицирование двигателя на различных рабочих режимах.

Выполнено сравнение рабочих режимов, индикаторной работы цикла, в том числе для различных значений массы свободного поршня, по результатам проведенного теоретического моделирования и экспериментальным данным, в том числе аналога ДПТ в литературе [5]. Экспериментально выявлено влияние хода и массы поршня на уровень индикаторной мощности опытного образца ДПТ. Наибольшее значение мощности соответствует уровню 17 Вт при работе с поршнем массой 57 г и частоте 11.8 Гц. Расчетные и экспериментальные значения имеют коэффициент корреляции 0,92...0,95.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moldenhauer, S. Analytical model of the pulse tube engine / Moldenhauer S. // *Energy*. – 2013. – V.62. – P. 285-299.
2. Hamaguchi, K. Measurement of work generation and improvement in performance of a pulse tube engine. / K. Hamaguchi, H. Futagi, T. Yazaki // *Journal of Power and Energy Systems*. – 2008. – V. 2. P. 1267-1275.
3. Gifford, W.E. Surface Heat Pumping / W.E. Gifford, R.C. Longworth // *Advances in Cryogenic Engineering*. New York: Plenum Press. – 1966. – V.11. – P.171-179.
4. Довгялло, А.И. Особенности теплообмена в термоакустических преобразователях / Довгялло А.И., Некрасова С.О. // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. – 2013. №3(41)Ч.2. – С. 113-121.
5. Moldenhauer, S. The pulse tube engine: A numerical and experimental approach on its design, performance, and operating conditions / S. Moldenhauer, T. Stark, C. Holtmann, A. Thess // *Energy*. – 2013. – V. 55. – P.703-715.

A.I. Dovgyallo, S.O. Nekrasova, D.V. Sarmin, A.Yu. Pulkina
Samara National Research University

FREE PISTON PULSE TUBE ENGINE: A NUMERICAL AND EXPERIMENTAL WORK GENERATION ESTIMATION

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ АГЛОМЕРАТОВ В РЕАГИРУЮЩЕЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С МЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Проблемы термической утилизации отходов связаны с низкой эффективностью их горения. Высокая доля негорючих компонентов, влажность, механическая неустойчивость слоя приводит к высокому механическому недожогу и повышенному образованию вредных веществ. Для решения этих проблем необходимо исследовать теплофизические процессы в реагирующем слое.

В состав отходов часто входят компоненты, термическое разложение и горение которых может приводить к локальному изменению проницаемости слоя, например, из-за размягчения и плавления на разных стадиях конверсии. Неоднородности проницаемости и температуры приводят к образованию агломератов – спекшихся кусков топлива, которые выгорают намного медленнее, чем отдельные частицы. В ряде экспериментальных работ исследовалось образование агломератов при горении и газификации биомассы [1], торфа [2], пластиков [3].

При исследовании процессов переноса в пористых средах часто используется математическое моделирование. Подобные математические модели предложены для расчета слоевого сжигания отходов [4]; для исследования неустойчивости фронта фильтрационного горения [5]; для исследования термических режимов пористых сред со сложной геометрией и свободной конвекцией [6]. В настоящей работе рассматривается математическая модель двумерной пористой среды с вынужденной конвекцией. Конденсированная фаза включает реакционноспособный компонент, превращения которого (химические или фазовые) приводят к резкому уменьшению локальной проницаемости. В такой постановке удастся численно исследовать концентрационные границы спекаемости для участка пористой среды.

Задача формулируется следующим образом: пористая среда (засыпка частиц) продувается горячим газом при постоянной разности давлений на входе и выходе. На рис. 1 приведены результаты расчетов средней скорости газа на выходе из засыпки постоянной высоты, в которой случайным образом распределены частицы плавящегося компонента. В зависимости от доли плавящегося компонента средняя проницаемость засыпки существенно изменяется, а течение приобретает существенную неоднородность: в засыпке формируются «прогары» и холодные области.

^(*) И.Г. Донской, donskoy.chem@mail.ru

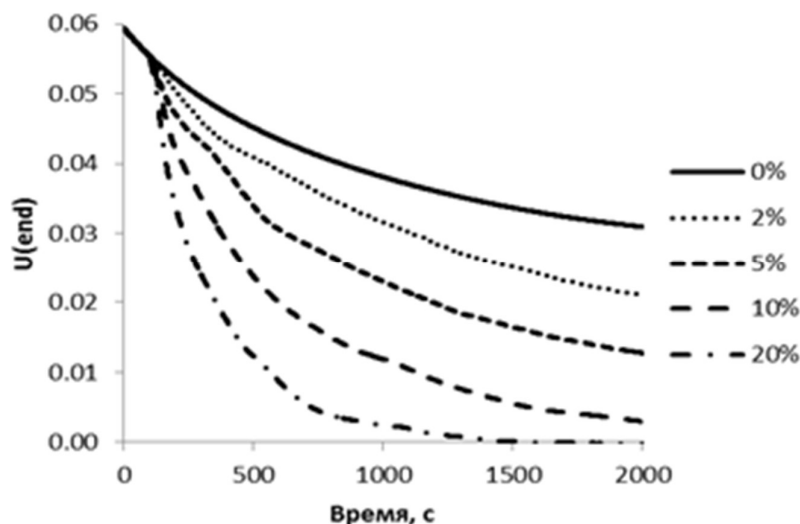


Рис. 1. Зависимость средней скорости газа на выходе из слоя частиц от доли плавящегося компонента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Revamping downdraft gasifier to minimize clinker formation for high-ash garden waste as feedstock / H. Siddiqui, S.K. Thengane, S. Sharma, S.M. Mahajani // *Bioresource Technology*. 2018. V. 266. P. 220-231.
2. Возможные пути предотвращения шлакования золы при газификации торфа в режиме фильтрационного горения / М.В. Цветков, И.В. Зюкин, В.М. Фрейман, М.В. Салганская, Ю.Ю. Цветкова // *ЖПХ*. 2017. Т. 90. № 10. С. 1392-1398.
3. Madadian E., Crowe C., Lefsrud M. Evaluation of composite fiber-plastics biomass clinking under the gasification conditions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 164. P. 137-145.
4. Yang Y.B., Swithenbank J. Mathematical modelling of particle mixing effect on the combustion of municipal solid wastes in a packed-bed furnace // *Waste Management*. 2008. V. 28. P. 1290-1300.
5. Алдушин А.П., Ивлева Т.П. Моделирование гидродинамической неустойчивости фильтрационного режима распространения фронта горения в пористой среде // *ФГВ*. 2015. Т. 51. № 1. С. 125-134.
6. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // *Combustion Theory and Modelling*. 2018. V. 22. No. 2. P. 359-377.

I.G. Donskoy
Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk

MATHEMATICAL MODELLING OF AGGLOMERATION IN REACTING POROUS MEDIA WITH CHANGING PERMEABILITY

ОЦЕНКА КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИССОЦИАЦИИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ПРИ $T < 273$ К

Газовые гидраты вызывают интерес в связи с широкой распространенностью и перспективами применения для хранения природного газа в мягких термобарических условиях [1, 2]. Использование гидратов пока ограничивается попытками добычи природного газа из скважин и с морского дна, а также пилотными проектами газогидратного транспорта.

Существующие проблемы использования гидратов так или иначе связаны с недостаточно полным пониманием физики процессов, протекающих при образовании и разрушении гидратной фазы. Это, в свою очередь, связано с многообразием явлений, сопровождающих диссоциацию [3].

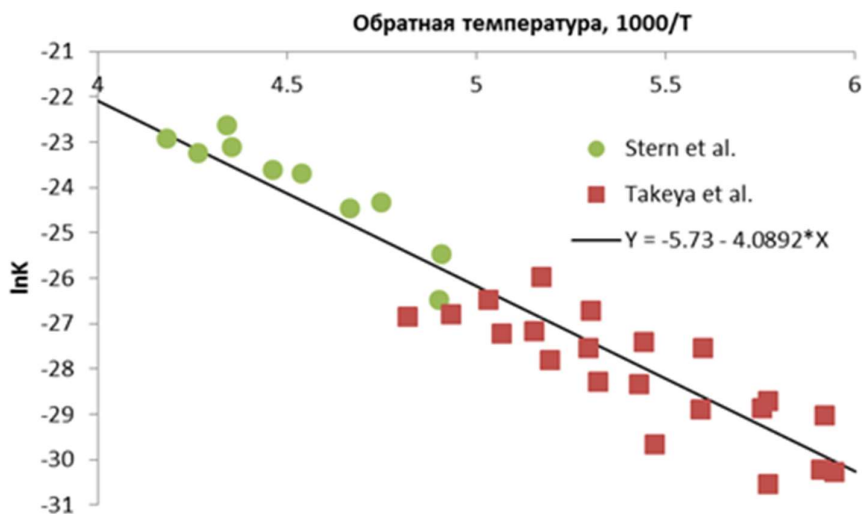


Рис. 1. Аррениусовский график: зависимость логарифма кинетической константы от обратной температуры. Маркерами соответствуют значениям, полученным при обработке экспериментальных данных.

Кинетика диссоциации гидратов при $T > 273$ К исследовалась в работах [4, 5]. В настоящей работе приводится попытка уточнить значения кинетических коэффициентов для области $T < 273$ К. Математическая модель разложения газового гидрата строится на основе модели сжимающегося ядра (shrinking-core). При подходящем отборе экспериментальных данных (отсутствие

(*) И.Г. Донской, donskoy.chem@mail.ru

самоконсервации, достаточно мелкие частицы и низкие скорости нагрева) удается обобщить экспериментальные данные [6, 7], как это показано на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что, несмотря на существенные различия в экспериментальных методах, полученные кинетические коэффициенты достаточно хорошо ложатся на единую зависимость. Эффективные параметры аррениусовской формы кинетического коэффициента при этом равны: $k_a^0 = 3.25 \times 10^{-5}$ кг/Па/м²/с; $E_a = 34$ кДж/моль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges / Z.R. Chong, S.H.B. Yang, P. Babu, P. Linga, X.-S. Li // *Applied Energy*. 2016. V. 162. P. 1633-1652.
2. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates / H.P. Veluswamy, A. Kumar, Y. Seo, J.D. Lee, P. Linga // *Applied Energy*. 2018. V. 216. P. 262-285.
3. Misyura S.Y. The influence of porosity and structural parameters on different kinds of gas hydrate dissociation // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. Article number: 30324.
4. Kinetics of methane hydrate decomposition / H.C. Kim, P.R. Bishnoi, R.A. Heidemann, S.S.H. Rizvi // *Chemical Engineering Science*. 1987. V. 42. No. 7. P. 1645-1653.
5. Clarke M., Bishnoi P.R. Determination of the activation energy and intrinsic rate constant of methane gas hydrate decomposition // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2001. V. 79. P. 143-147.
6. Anomalous preservation of pure methane hydrate at 1 atm / L.A. Stern, S. Circone, S.H. Kirby, W.B. Durham // *J. Phys. Chem. B*. 2001. V. 105. P. 1756-1762.
7. Particle size effect of CH₄ hydrate for self-preservation / S. Takeya, T. Uchida, J. Nagao, R. Ohmura, W. Shimada, Y. Kamata, T. Ebunima, H. Narita // *Chemical Engineering Science*. 2005. V. 60. No. 5. P. 1383-1387.

I.G. Donskoy¹, S.Ya. Misyura²

¹Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk,

²Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk

ESTIMATION OF GAS HYDRATES DISSOCIATION KINETIC COEFFICIENTS AT T < 273 K

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ МЕНИСКА ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРНОЙ КАНАВКЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ИСПАРЕНИИ

В процессе парообразования в зоне испарения ТТ, около 80% тепла проходит через область тонкой пленки испарительной зоны мениска жидкости [1]. Мениск жидкости на рис. 1 в капиллярной канавке ТТ делится на 3 зоны: I - не испаряющаяся, II - тонкая пленка испарительной зоны и III – зона основного мениска [1-4].

Целью работы является исследование влияния кривизны мениска жидкости в капиллярной канавке тепловой трубы (далее ТТ) на коэффициент теплопередачи при испарении.

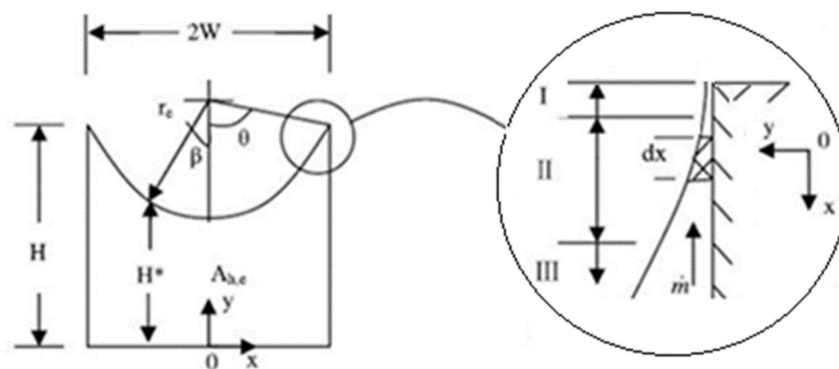


Рис. 1. Схематическое изображение мениска жидкости в прямоугольной канавке

Был проведен цикл экспериментов на модели ТТ - алюминиевой пластинки, разработанной в соответствии с параметрами влияющими на работу ТТ [5-6], с 4 канавками различной ширины от 0.8 мм до 2 мм и последующим использованием полученных параметров в расчете коэффициента теплопередачи. Экспериментальная установка состояла из микроскопа ZEISS при использовании объектива 10 кратного увеличения, камеры, подключенной к компьютеру, на котором наблюдалась картина изменения формы мениска при испарении жидкости из канавок пластины, так же использовался специальный пакет программ для получения изображения, обработки данных и чтения информации из датчика температуры. Испарение подаваемой жидкости происходило при подогреве пластины нагревательным элементом мощностью в 1 Вт, соединенной

(*) И.И. Дугур, duguri@mail.ru

с источником энергии. Помимо изображения мениска записывались данные температур с поверхности пластины в различных точках с помощью термопар К типа, соединенных с датчиком температуры VOLTcraft.

В табл. 1 представлены результаты для одной канавки шириной в 0,8 мм при постоянных значениях. Анализ полученных параметров и расчет данных [5-8] до сих пор продолжаются, т.к. есть сложность в отсутствии методики расчета теплопередачи в столь малых участках.

Таблица 1. Результаты для одной канавки шириной в 0,8 мм

Толщина пленки во II зоне мениска 10^{-3} , м	Высота мениска 10^{-3} , м	Угол смачивания	Температура на поверхности мениска, °C	Кривизна мениска, 1/м	Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² К
0	0,969	50°	41,085	47,214	0,044
0,045	0,925	52°	41,157	210,819	0,046
0,089	0,894	57°	41,207	149,906	0,048
0,133	0,867	63°	41,252	122,628	0,05
0,179	0,850	67°	41,279	105,703	0,051

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheng P., Dong J., Thompson S.M. and Ma H.B. Heat transfer in bulk and thin-film fluid regions of rectangular microgroove // J. Thermophysics and Heat Transfer, 2012. V. 26. No. 1. P. 108
2. Jiao A.J., Ma H.B., Critser J.K. Evaporation heat transfer characteristics of a grooved heat pipe with micro-trapezoidal grooves // Int. J. Heat and Mass Transfer, 2007. V. 50. P. 2905
3. Ma H.B., Cheng P., Borgmeyer B. and Wang Y.X. Fluid flow and heat transfer in the evaporating thin film region // Microfluid Nanofluid, 2008. V. 4. P. 237.
4. Sharmishtha Singh Hada Influence of different parameters on heat pipe performance // Int. J. Engineering Research and Applications, 2015. V. 5. P. 93.
5. Fagri A. Heat pipe science and technology. C.: Global Digital Press, 2016. P. 631.
6. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 297 с.
7. Смирнов Г.Ф., Цой А.Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно – пористых структурах. М.: Изд. дом МЭИ, 1999. 124 с.
8. Bracco G., Holst B. Surface science techniques. B.: Springer, 2013. P. 663.

I.I. Dugur¹, N.M. Savchenkova¹, V. Jovicic², A. Delgado²

¹Moscow Power Engineering Institute,

²Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg, Germany

A STUDY ON THE EFFECTS OF MENISCUS CURVATURE OF LIQUID IN CAPILLARY GROOVES TO HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN EVAPORATION

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ДИФфуЗИОННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ
РЕАГИРУЮЩИХ СТРУЙ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ**

Применение закрутки потока является известным и признанным способом интенсификации процессов тепломассообмена, гидрогазодинамики и горения, в том числе в струйных течениях. Такие течения в силу простоты их организации и одновременно достаточно высокой эффективности встречаются практически во всех элементах и рабочих процессах энергетической и газотурбинной техники. По этой причине, перспективным считается организация и поиск оптимальных рабочих режимов струйных течений с закруткой потока. Одним из наиболее эффективных способов организации струйного потока является комбинированное течение, в ядре которого реализуется прямолинейная струя, а на периферии - закрученная. Применение закрученных комбинированных струй в вопросах организации диффузионного сжигания топлива в камерах сгорания двигателей, микрофакельных технологий горения, системах охлаждения термических напряженных стенок элементов ГТД позволит повысить эффективность рабочего процесса установки, улучшить экологические характеристики горения, увеличить качество организации тепловой защиты и ресурсные показатели в целом.

При решении задач горения в роли осевого потока, как правило, выступает газообразное топливо, реагирующее с окислителем в составе спутного закрученного воздушного периферийного потока, что позволяет существенно интенсифицировать процесс за счет повышения массовой скорости горения. Несмотря на существенные преимущества организации комбинированных струйных течений, остается нерешенным большое количество вопросов и проблем, связанных со сложностью описания протекающих в них процессов с помощью математических моделей, а также отсутствием реальных практических рекомендаций по их применению в технике.

Одним из таких вопросов является установление взаимосвязи структуры струи с динамикой выгорания топлива по ее длине. Отмеченные исследования сталкиваются с необходимостью всестороннего комплексного изучения влияния многих факторов на процесс горения, к числу которых прежде всего следует отнести параметр закрутки, числа Re топливной и воздушной компонент, внешние воздействия в виде сносящего потока, свободной и вынужденной конвекции.

^(*) О.А. Евдокимов, yevdokimov_oleg@mail.ru

Проведенные экспериментальные исследования показывают, в частности, что влияние свободной конвекции в виде воздействия на комбинированное течение термогравитационной силы оказывается существенно различным при варьировании чисел Re компонент струи. При значении числа Рейнольдса воздушной струи $Re < 5000$ закрутка потока разрушается на достаточно малом расстоянии относительно сопла генератора струи и последующее распространение пламени происходит в направлении свободной конвекции. Увеличение величины параметра закрутки S приводит к количественному изменению отмеченной зависимости, тем не менее, качественной перестройки в структуре потока не происходит.

В то же время диапазон значений числа $Re > 7000$ характеризуется формированием устойчивого комбинированного течения, слабо зависящего от свободных конвективных потоков. В этом случае термогравитационной деформации чаще всего подвергается «вершина» факела, характеризуемая существенным недостатком окислителя, эжектируемого из атмосферы.

Численные исследования комбинированных закрученных струй на моделях горения EDM, PDF Flamelet и BVM показали высокую чувствительность прогнозирования положения фронта пламени относительно граничных условий расчета. При этом использование модели BVM позволило более точно предсказать безразмерные линейные характеристики струи, такие как криволинейную длину, высоту и ширину факела, а также среднемассовую скорость выгорания топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №18-79-00180 «Теплофизика комбинированных реагирующих и импактных струйных течений».

O.A. Evdokimov, A.I. Guryanov
Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University

**THERMOPHYSICAL FEATURES OF PROPAGATION OF DIFFUSION
AND COMBINED SWIRLING REACTING JETS UNDER FREE
CONVECTION**

М.Ю. Егоров^{1, 2, (*)}, П.Л. Аксенов¹, А.И. Иванов¹, И.И. Коваленко²,
Н.Н. Литвинова², Н.П. Лавровская², И.П. Крехтунова², А.С. Критченков^{3, 4, 5}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,

³Российский университет дружбы народов,

⁴Институт высокомолекулярных соединений РАН,

⁵Санкт-Петербургский НИУ ИТМО

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СЕПАРАТОРОВ- ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ ТУРБИН АЭС

Актуальность. Сепараторы-пароперегреватели турбин насыщенного пара размещаются между ступенями высокого и низкого давления. Надёжность аппаратов определяет экономичность эксплуатации турбин и АЭС. Однокорпусные вертикальные аппараты включают 1) входную камеру, где осуществляется сепарация крупнодисперсной влаги от пара; 2) сепарационную часть, в которой происходит дальнейшая сепарация влаги; 3) перегревательную часть, в которой выполняется перегрев осушенного пара до параметров надёжной работы цилиндра низкого давления. Сепаратор расположен в верхней части аппарата, перегреватель – в нижней.

Цель совершенствования сепараторов-пароперегревателей Ленинградской, Смоленской и других АЭС, которая проведена по инициативе ОАО «Концерн «Росэнергоатом» — повышение эффективности их работы. Совершенствование сепарационной части основано на замене отечественных жалюзийных сепарационных пакетов на жалюзийные пакеты типа «Powervane» (Германия). Совершенствование пароперегревательной части базируется на замене теплообменных модулей и труб разводки из стали 08Х18Н10Т на модули и трубы разводки из других материалов, имеющих меньшую склонность к растрескиванию при попадании на них влаги.

Результаты. Выполнен анализ промышленных экспериментов по измерению параметров работы турбоустановок, включая замеры расходов сепарата после сепаратосборника (рис. 1) и расходов конденсата греющего пара после конденсатосборников I (рис. 2) и II ступеней перегрева, а также замеры температуры нагреваемого пара в поворотных камерах сепараторов-пароперегревателей перед и после модернизации.

Выводы.

1. На основе анализа состояния пароперегревательных модулей и труб разводки установлено, что в течение периода эксплуатации сепараторов-пароперегревателей наблюдаются повреждения их пароперегревательной части.

(*) М.Ю. Егоров, mikhail.yu.egorov@gmail.com

2. Установлено, что наиболее часто выходят из строя пароперегревательные модули первой ступени. Это объясняется термопульсациями. Они возникают при попадании влаги с относительно низкой температурой на горячие трубки разводки и трубные доски. При этом осуществляется отключение повреждённых модулей или отдельных трубок. Последнее приводит к снижению выходной температуры перегретого пара.

3. Совершенствование пароперегревательной части с заменой материала модулей и труб разводки позволяет значительно снизить вероятность повреждения пароперегревательной части при наличии термопульсаций и обеспечить проектные параметры работы турбин АЭС.

Результаты проведенных измерений температурных и расходных характеристик работы системы промежуточной сепарации и перегрева на Смоленской АЭС показали, что проведенная модернизация позволила приблизить работу системы к проектным параметрам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности СПбПУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2016-2020 гг.

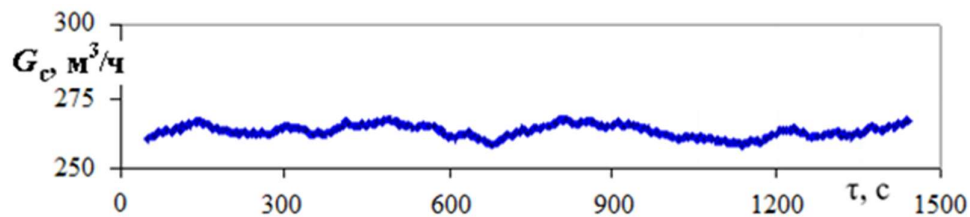


Рис. 1. Измеренный общий расход сепарата G_c турбины № 7

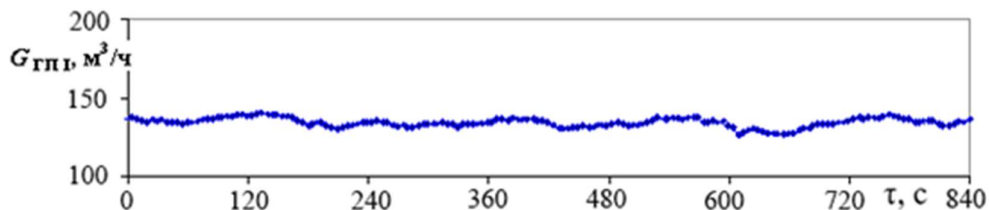


Рис. 2. Измеренный общий расход конденсата греющего пара I ступени $G_{гп}$ турбины № 7

M.Yu. Egorov^{1,2}, P.L. Aksenov¹, A.I. Ivanov¹, I.I. Kovalenko², N.N. Litvinova²,
N.P. Lavrovskaya², I.P. Krectunova², A.S. Kritchenkov^{3,4,5}

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

²St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,

³Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),

⁴Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences,

⁵Saint-Petersburg ITMO University

IMPROVING OF THE MOISTURE SEPARATORS – REHEATERS OF TURBINE NPP

М.Ю. Егоров^{1, 2, (*)}, И.И. Касаткин¹, А.И. Иванов¹, И.И. Коваленко²,
Н.Н. Литвинова², Н.П. Лавровская², И.П. Кректунова², А.С. Критченков^{3, 4, 5}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,

³Российский университет дружбы народов,

⁴Институт высокомолекулярных соединений РАН,

⁵Санкт-Петербургский национальный исследовательский
университет информационных технологий, механики и оптики

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СЕПАРАЦИИ И ПЕРЕГРЕВА ПАРА СМОЛЕНСКОЙ АЭС

Актуальность. Системы промсепарации и парового перегрева пара входят в состав влажнопаровых турбоустановок АЭС. Они осуществляют сепарацию пара низкого давления после цилиндра высокого давления и его последующий одно- или двухступенчатый перегрев до значений, обеспечивающих надежную эксплуатацию цилиндров низкого давления. Температура перегреваемого пара на выходе из системы определяет эффективность турбины АЭС в целом. Эта температура зависит от состояния теплообменного оборудования.

Цель исследования — повышение эффективности работы системы промежуточной сепарации и перегрева пара турбин АЭС за счет модернизации пароперегревательной части. Модернизация выполнена Концерном «Росэнергоатом» на Смоленской и других АЭС. Она основана на замене теплообменных элементов из стали 08X18H10T на аналогичные из материалов с меньшей склонностью к растрескиванию при попадании на них влаги.

Результаты. Проведен анализ повреждаемости теплообменных элементов до модернизации на Смоленской АЭС, см. пример на рис. 1.

Установлено, что выходная температура перегретого пара в немодернизированной системе на (5...10)°С ниже аналогичной для модернизированной. Проектный уровень перегрева пара составляет (263±5)°С.

Теплогидравлические расчеты показали, что влияние отключения в I ступени на величину снижения температуры перегрева пара ниже. При отключении одного элемента II ступени температура снижается на 1°С. Кроме числа отключенных элементов на уровень перегрева также оказывают влияние различия в обвязке, работе сепарационных устройств, входные влажности пара.

На рис. 2 приведена связь средних температур пара на выходе с суммарным (в I и II ступенях) числом отглушенных теплообменных элементов.

(*) М.Ю. Егоров, mikhail.yu.egorov@gmail.com

Вывод. Проведенная модернизация пароперегревательной части на Смоленской АЭС обеспечила устойчивую работу системы промежуточной сепарации и перегрева пара, приблизив ее работу к проектным параметрам.

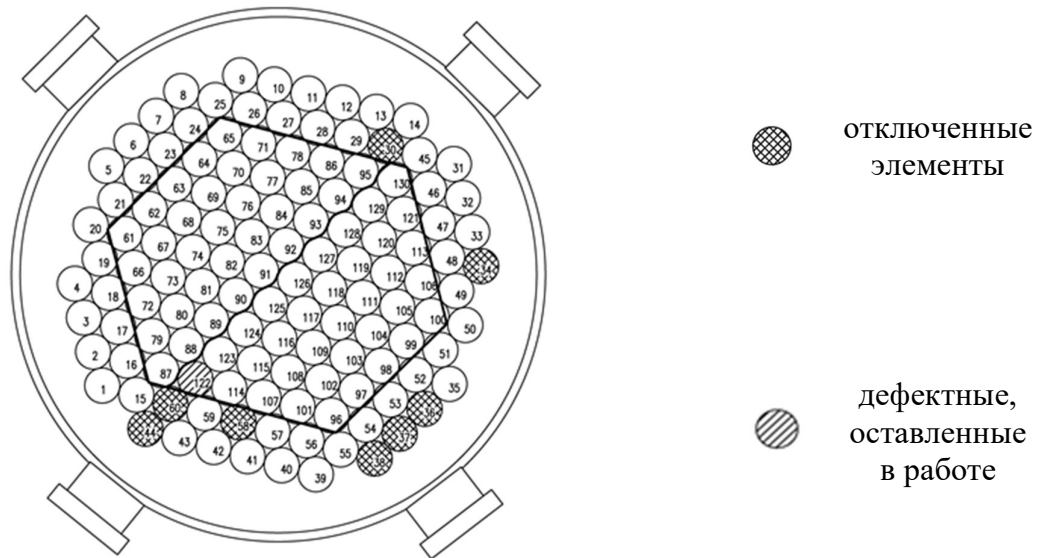


Рис. 1. Картограмма состояния теплообменных элементов турбины № 1 Смоленской АЭС

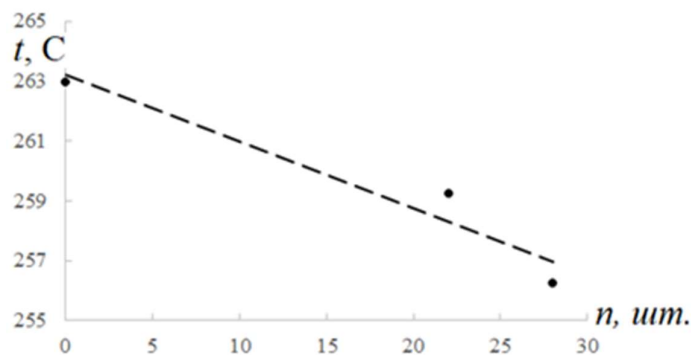


Рис. 2. Зависимость температуры перегрева t от количества отключенных элементов n

М. Yu. Egorov^{1,2}, I. I. Kasatkin¹, A. I. Ivanov¹, I. I. Kovalenko², N. N. Litvinova²,
N. P. Lavrovskaya², I. P. Krectunova², A. S. Kritchenkov^{3,4,5}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

²St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,

³Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),

⁴Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences,

⁵Saint-Petersburg ITMO University

**IMPROVING OF ENERGY EFFICIENCY OF HEAT-EXCHANGE
EQUIPMENT OF THE SYSTEM FOR INTERMEDIATE SEPARATION AND
SUPERHEATING OF THE SMOLENSK NPP**

КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ПРИСУТСТВИИ ФТОРУГЛЕРОДОВ НА ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ ЖИДКОСТИ

В работе проведено экспериментальное исследование процессов: конденсации чистого водяного пара на турбулентной струе жидкости, конденсации при наличии октафторпропана в парогазовой смеси (ПГС). Экспериментальные данные свидетельствуют: при объемной концентрации СЗФ8 ($0 \leq \beta \leq 0,3$) в ПГС для диаметра сопла 0,4 мм при скорости истечения жидкости из сопла ниже 15 м/с количество сконденсировавшегося водяного пара из ПГС выше, чем при конденсации чистого пара на струе воды. При скоростях больших 15 м/с наблюдается снижение интенсивности конденсации водяного пара из ПГС по сравнению с чистым паром. Аналогичная картина наблюдается и для сопла 0,6 мм для скорости 12 м/с. Степень влияния на конденсацию двух противоположно действующих эффектов, связанных с температурой на межфазной поверхности и поверхностным натяжением смеси [1] выявлена на базе численной модели [2] рассматриваемых задач. представлены на рисунке 1. Из результатов расчета видно (рисунок 1), что для сопел 0,4 и 0,6 мм при скоростях истечения воды из сопла 15 и 12 м/с уровень нерегулярных возмущений межфазной поверхности h достигает максимальной величины равной размеру турбулентного моля l_T даже для условий конденсации чистого пара.

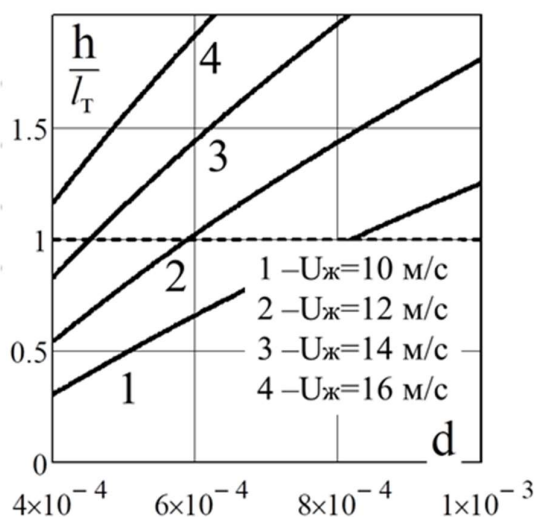


Рис. 1. Зависимость нерегулярных возмущений межфазной поверхности струи от диаметра сопла и скорости жидкости

^{*)} В.В. Понуровская, berenika973@mail.ru

Коэффициент турбулентной теплопроводности в рамках рассматриваемой модели [2] при этом достигает максимума. В этом случае при добавлении октафторпропана в водяной пар эффект, связанный с поверхностным натяжением смеси перестает работать и процесс конденсации протекает аналогично конденсации водяного пара из паровоздушной смеси.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-08-00308

ЛИТЕРАТУРА

1. Y.V. Yezhov and VS Okhotin. The influence of surface-active agents in gas mixture on the intensity of jet condensation. To cite this article: 2017 Journal of physics conference series 891 (2017) 012133. doi:10.1088/1742-6596/891/1/012133.
2. Солодов А.П., Ежов Е.В. Модель струйной конденсации. Теплоэнергетика. 1984. № 3, 32-35.

E.V. Ejov, V.V. Ponurovskaya, S.P. Kolotukhin, I.M. Mazurin
MPEI

CONDENSATION OF WATER VAPOR IN THE PRESENCE OF FLUOROCARBONS INTO THE TURBULENT STREAM OF LIQUID

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ УДАЛЕНИЯ ЗОЛЫ ИЗ БУНКЕРОВ ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализируются различные схемы золоудаления от бункеров золоуловителей к средствам транспортирования, например, каналам гидрозолоудаления. Отмечаются недостатки этих схем: большие расходы смывной воды, перетоки газов через общие золовые желоба между бункерами различного давления, забития течек золой. Рассматривается устройство (изобретение) [1], внедрение которого устранил или уменьшит указанные недостатки путем повышения надежности схем и централизации сброса золы.

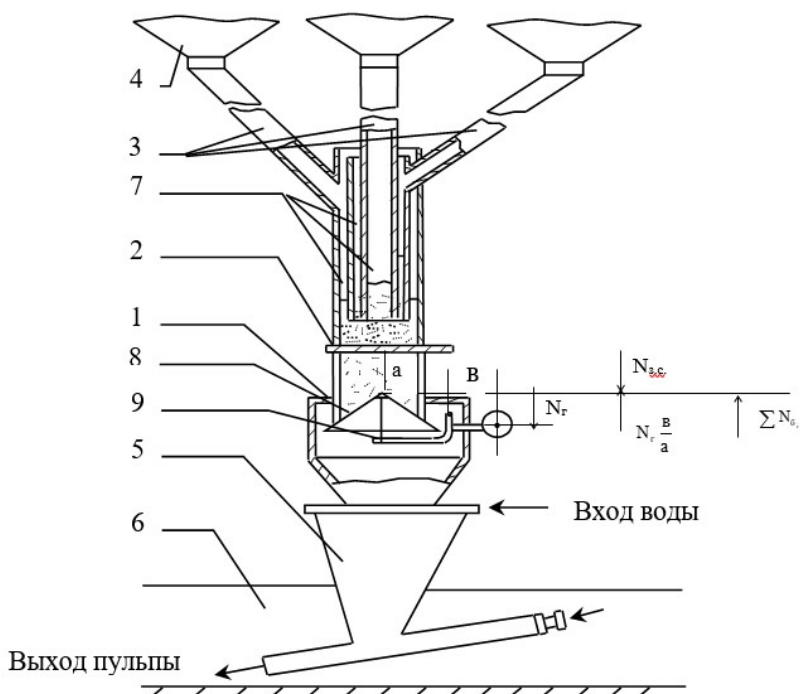


Рис. 1. Устройство для централизованного сброса золы из нескольких бункеров, находящихся под различным давлением: 1- затвор непрерывного действия (мигалки); 2-затвор периодического действия (шибер); 3- течки; 4- бункера; 5- водозоловой смеситель; 6- канал гидрозолоудаления; 7- коаксиальный ввод течек; 8-клапан; 9-рычаг; а,в – расстояния от центров тяжести, соответственно, клапана мигалки и груза до оси вращения рычага; $\sum N_{\epsilon}$ - сумма сил, притягивающих клапан мигалки к желобу из-за разницы давлений в окружающей среде и золовых бункерах; N_r - сила тяжести груза; $N_{з.с.}$ - сила тяжести золового столба

^(*) В.К. Елсуков, elswk@mail.ru

Высокая эффективность рассматриваемого изобретения иллюстрируется примером его практического использования в районной Галачинской котельной г.Братска. Для определения конструктивно-эксплуатационных параметров рассматриваемого изобретения (устройства) разработана его математическая модель, основанная на балансе сил, действующих в нем на затвор непрерывного действия (рис. 1). Балансовое уравнение сил в условиях равновесия, действующих на затвор непрерывного действия, имеет вид:

$$\sum N_{\text{б}_i} + N_{\text{г}} \cdot \left(\frac{b}{a}\right) = N_{\text{з.с}}$$

Кроме представленного уравнения модель включает формулы по определению всех параметров, входящих в него. С помощью полученной модели выполнены расчеты конструктивно-эксплуатационных параметров рассматриваемого устройства в трех возможных вариантах его реализации. В указанных вариантах менялось число секций различного давления и учитывалось наличие затвора периодического действия. Определяемыми параметрами являются максимальная и минимальная высоты золотого столба, масса и положение груза затвора непрерывного действия. Выявлены эксплуатационные показатели золоуловителя, влияющие на указанные параметры. В качестве примера принят золоуловитель типа ЦБР-150У-1280, имеющий золотые бункера с тремя различными значениями разрежений. На основе разработанной модели составлен алгоритм расчета конструктивно-эксплуатационных параметров рассматриваемого устройства при его проектировании. В зависимости от геометрических параметров золоуловителей определено предельное число бункеров, присоединяемых к рассматриваемому устройству.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1747801 РФ, МКИ F23J1/00 Устройство для централизованного сброса золы из нескольких бункеров, находящихся под различным давлением/ В.Т. Швалов, В.К. Елсуков, Л.В. Румянцева, Н.А. Якименко// Открытия. Изобретения. 1992. № 26.

V.K. Elsukov, P.M. Ogar
Bratsk State University, Bratsk

IMPROVEMENT OF SCHEMES FOR ASH REMOVAL FROM THE HOPPER ASH COLLECTORS BASED ON MODELING

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСНОЙ СПОСОБНОСТИ БУРОВОГО РАСТВОРА

За последнее время всё больше работ направлено на разработку и совершенствования буровых растворов. Одним из основных процессов, происходящих при бурении скважин, является процесс циркуляции бурового раствора в стволе скважины с целью охлаждения бурового инструмента и выноса выбуренной породы. Неэффективный вынос частиц выбуренной породы (шлама) может приводить к целому ряду аварийных ситуаций, таких как прихват и заклинивание бурового инструмента [1].

Твердые частицы любого вида, которые слишком велики, чтобы свободно пройти через затрубное пространство, могут заклиниваться между бурильной колонной и стенками скважины и вызывать прихват трубы. При этом частицы малого размера могут вызывать прихват трубы против стабилизаторов большого диаметра или других частей «компоновки нижней части бурильной колонны». К числу частиц, которые могут приводить к прихвату труб, относятся посторонние частицы типа шарошек долот или обломков породы, которые падают в затрубное пространство со стенок скважины. Когда одновременно в скважину падает небольшое количество обломков породы, прихвата труб можно избежать умелой манипуляцией буровыми инструментами. Путем осторожного подъема, вращения или опускания бурильной колонны, а также пуска и останова бурового насоса можно заставить обломки породы упасть на забой, где их можно разрушить долотом.

Поэтому наиболее актуальной задачей является разработка растворов, которые бы имели высокую выносную способность по удалению частиц шлама в процессе сооружения скважин.

Для реализации данной задачи было проведено расчетно-экспериментальное исследование транспорта шлама в кольцевых каналах.

Были приготовлены и изучены различные составы буровых растворов на полимерной основе с различной реологией. Получены данные зависимости реологических параметров бурового раствора от скорости сдвига, от концентрации компонентов. Получены данные о удерживающей способности данных растворов удерживать шлам в состоянии покоя. Полученные данные по

(*) В.А. Жигарев, Zhigarev.vladimir@yandex.ru

реологии разработанных составов легли в основу последующих расчетов по изучению выносной способности буровых растворов на полимерной основе.

Проведено расчетное исследование по изучению транспорта шлама в кольцевых каналах буровыми растворами на полимерной основе. Получены результаты распределения шлама по длине канала и в сечениях канала в зависимости от времени. Получены данные зависимости транспорта шлама от параметров течения. Получены данные о значении перепада давления в кольцевом канале в зависимости от режима течения бурового раствора. Исследовано влияния наличия эксцентриситета на перепад давления в кольцевом канале.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «18-41-240001 Расчетно-экспериментальное исследование транспорта шлама в кольцевых каналах».

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М.: Недра, 1989. 270 с.

V.A. Zhigarev¹, A.V. Minakov^{1,2},
A.L. Neverov¹, A.V. Matveev¹

¹Siberian Federal University,

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

NUMERICAL-EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CUTTING TRANSPORT OF THE DRILLING MUDS

ПРОИЗВОДСТВО СИНТЕЗ-ГАЗА ИЗ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД С ЦЕЛЬЮ ДАЛЬНЕЙШЕГО СИНТЕЗА БИОМЕТАНОЛА

Осадок сточных вод (ОСВ) представляет из себя отходы, образующиеся на очистных сооружениях, как результат очистки бытовых, атмосферных и производственных сточных вод. Как правило, данный вид отходов не подвергается какой-либо переработке, а складывается на полях в исходном виде с влажностью 85-90 масс. %.

Исследования элементного состава осадка сточных вод (таблица 1) показывают, что в его составе значительную долю занимает углерод, в связи с чем низшая теплота его сгорания составляет 18,9 МДж/кг.

Таблица 1. Элементный состав и содержание летучих компонентов в ОСВ

Зольность, масс. %	Доля летучих, масс. %	Элементный состав, масс. %				
Сухое состояние						
<i>A</i>	<i>M_{вр}</i>	С	Н	N	S	О
23,45	70,01	44,13	5,85	5,24	0,84	20,49

метода утилизации ОСВ. Он заключается в двухстадийной пиролизической конверсии биомассы в газообразное топливо, который объединяет достоинства процессов газификации и пиролиза [1]. Суть метода состоит в том, что перерабатываемое сырье проходит стадию пиролиза при температуре 500°C. Образующиеся при этом пиролизные газы и пары фильтруются через слой керамики, поддерживаемой при фиксированной температуре 1000°C. В данной среде происходит быстрый нагрев летучих продуктов пиролиза, сопровождающийся гетерогенным крекингом высокомолекулярных углеводородных соединений, входящих в их состав. Получаемая газовая смесь представляет собой синтез-газ, основными компонентами которого являются водород и монооксид углерода.

Результаты расчета материального баланса, а также химический состав синтез-газа представлены на рис.1.

^(*) О.М. Ларина, olga.m.larina@gmail.com

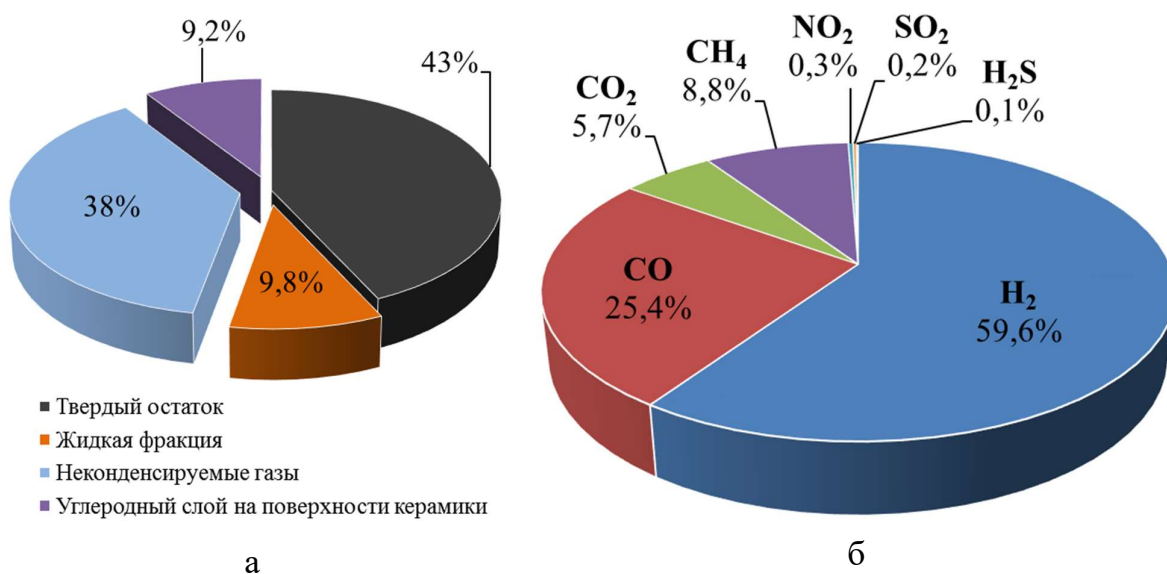


Рис. 1. Материальный баланс процесса пиролиза ОСВ до 500°С с термическим крекингом (а) и химический состав полученного при этом синтез-газа (б)

Среди продуктов пиролитической переработки ОСВ с крекингом летучих продуктов синтез-газ составляет 38 % от массы исходного материала (рис. 1а). Жидкая фракция, исходя из внешнего вида, состояла из воды и легких летучих компонентов. В виду отсутствия углерода на поверхности керамики не может протекать реакция паровой конверсии угля. В связи с этим в составе синтез-газа всегда будут присутствовать пары воды. На поверхности керамики в процессе крекинга осаждается слой углерода в связи с деструкцией тяжелых углеводородов и, например, метана.

Исследования состава синтез-газа (рис. 1б) показали, что суммарное содержание H₂ и CO в нем составляет 85 об.%, при этом отношение H₂/CO в таком газе равняется 2,3. Данное значение является идеальным для дальнейшего синтеза биометанола согласно реакции $2\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$. В газе присутствуют примеси серы, что является губительным для катализаторов синтеза биометанола. Для дальнейшего использования такой синтез-газ нуждается в очистке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батенин В.М., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А. Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо // ДАН, 2012. Т. 446. № 2. С. 179–182.

V.M. Zaichenko, O.M. Larina
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

PRODUCTION OF SYNGAS FROM SEWAGE SLUDGE FOR BIOMETHANOL SYNTHESIS

**ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ ЗА СЧЕТ
ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ БАКОВ-АККУМУЛЯТОРОВ**

На ТЭЦ, подключенных к открытым системам теплоснабжения, с расходом подпиточной воды теплосети, превышающим 1000 т/ч, и имеющих достаточное количество баков-аккумуляторов, существует возможность снизить долю конденсационной выработки электроэнергии в период несения станцией максимальной электрической нагрузки.

Развитие рыночных отношений между поставщиками и потребителями тепловой и электрической энергии обуславливает повсеместное введение коммерческого учета, что также закреплено законодательно в редакции Федерального закона № 261–ФЗ от 23.11.2009 года [1].

Как правило, на ТЭЦ значительные расходы исходной подпиточной воды подогреваются во встроенных пучках конденсаторов теплофикационных турбин, что позволяет вырабатывать наибольшее количество электроэнергии на тепловом потреблении, а, следовательно, существенно экономить первичные энергоносители.

В целях повышения энергоэффективности тепловых электростанций предложен новый режим работы водоподготовительной установки (ВПУ) приготовления подпиточной воды теплосети, при котором в часы максимального электропотребления при максимальном пропуске пара в конденсаторы паровых турбин подпиточную воду теплосети аккумулируют в существующих баках-аккумуляторах за счет увеличения пропуски исходной подпиточной воды теплосети через встроенный пучок конденсатора паровой турбины, а в часы пониженных электрических нагрузок накопленную в баках-аккумуляторах подпиточную воду теплосети направляют в обратный трубопровод теплосети перед сетевыми подогревателями с одновременным уменьшением пропуски исходной подпиточной воды теплосети через встроенный пучок конденсатора паровой турбины [2, 3]. Подобная схема работы позволяет сохранить полезную емкость аккумуляторных баков для дальнейшего их заполнения в часы, приходящиеся на период несения станцией максимальной электрической мощности и повысить выработку электроэнергии на тепловом потреблении в часы максимального электропотребления при максимальном пропуске пара в конденсаторы паровых турбин.

Основным преимуществом нового режима работы водоподготовительной установки приготовления подпиточной воды теплосети является возможность

^(*) И.В. Губин, gubin_igor_91@mail.ru

обеспечения требуемого подогрева исходной подпиточной воды теплосети перед декарбонизацией и вакуумной деаэрацией (до 30–35 °С) за счет отработавшего пара турбин. При использовании типовой схемы заполнения баков-аккумуляторов в ночное время, как правило, турбины ТЭЦ работают с минимальными попусками пара в конденсаторы, что не позволяет обеспечить требуемый подогрев исходной подпиточной воды.

Проведенный анализ фактического режима работы Ульяновской ТЭЦ–1 в зимний период показал, что нагрев исходной подпиточной воды теплосети во встроенных пучках конденсаторов турбин не превышает 10–12°С. Дальнейший подогрев воды до 30–35°С осуществляется в подогревателе исходной воды (ПХОВ) за счет пара производственного отбора. Расчеты показали, что при работе электростанции в режиме заполнения баков-аккумуляторов в часы максимального электропотребления дополнительная мощность, вырабатываемая турбоустановкой с турбиной типа Т–100–130 на тепловом потреблении, составляет 8,1 МВт, а годовая экономия условного топлива превышает 9300 тонн.

Предложенное решение позволяет повысить эффективность деаэрации за счет выравнивания расхода исходной подпиточной воды теплосети перед вакуумным деаэратором, а также обеспечить увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении без снижения качества водоподготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Российская газета. – 2009. – №5050. – 27.11.2009.
2. Губин, И.В. Повышения тепловой экономичности ТЭЦ при оптимизации работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети / И.В. Губин // Молодежный инновационный форум Пятый Международный Россия, г. Ульяновск, 1416 сентября 2016 года): сборник аннотаций проектов / сост. Е. А. Глухова, Ю. Е. Чамчян. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 658 с.
3. Губин, И.В. Об эффективном использовании баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети для повышения тепловой экономичности ТЭЦ / Губин И.В. // В сборнике: Теплоэнергетика и теплоснабжение. Сборник научных трудов научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ. Вып. 12. Ульяновск: 2016. С. 123-129.

M.M. Zamaleev, I.V. Gubin, V.I. Sharapov
Ulyanovsk State Technical University

OPPORTUNITIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF TPP BY OPTIMIZING THE MODE OF OPERATION OF STORAGE TANKS

СИСТЕМА ОЧИСТКИ НАТРИЯ I КОНТУРА РЕАКТОРА БН-800 БЕЛОЯРСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

В данной работе рассмотрена система очистки натрия первого контура 4 энергоблока Белоярской атомной станции. Система очистки натрия является необходимой системой для нормальной эксплуатации реакторной установки на быстрых нейтронах. Реакторы на быстрых нейтронах позволяют сжигать весь природный уран, а также торий, не имеющий изотопов, делящихся тепловыми нейтронами. В качестве теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах используется жидкий натрий [1]. Однако для безопасной эксплуатации реактора с натриевым теплоносителем требуются специальные системы для его очистки. Преимущества Na, как теплоносителя заключаются в возможности работы на низком давлении в первом контуре; использование натрия позволяет уменьшить расходы энергии на собственные нужды из-за малых объемов перекачивания; натрий обеспечивает больший коэффициент теплоотдачи от поверхности оболочки ТВЭЛа по сравнению с водяным теплоносителем, а также имеет низкую температуру плавления.

Существует и ряд недостатков, которые затрудняют широкомасштабное применение натрия как теплоносителя: появление O_2 в жидком Na приводит к коррозии металла; существует необходимость обеспечивать замкнутый круг циркуляции теплоносителя с двойной герметизацией, хотя оксиды натрия могут частично закупоривать систему охлаждения теплоносителя; также необходимо ставить радиационную защиту в систему циркуляции и охлаждения для предотвращения возможности образования Na^{24} , испускающего β -частицу и 2 γ -кванта.

Очистка натрия производится в фильтр-ловушке, принцип действия которой основан на охлаждении натрия до температуры несколько ниже температуры насыщения при данной концентрации растворенных примесей и улавливания выпавших кристаллов примесей в зоне фильтра, в зоне охлаждения и в зоне отстойника. Для снижения температуры «грязного» натрия на входе фильтр-ловушку и подогрева «чистого» натрия, который отводится из фильтр-ловушки, предназначен рекуператор, установленный в системе очистки. Это теплообменный аппарат, где происходит обмен тепла между «грязным» (горячим) натрием, циркулирующим внутри корпуса реактора, и «чистым» (холодным) натрием, циркулирующим по трубной системе. При очистке натрия, подаваемого из системы бакового хозяйства I контура, рекуператор байпасируется.

^(*) А.В. Замятина, zanya97@yandex.ru

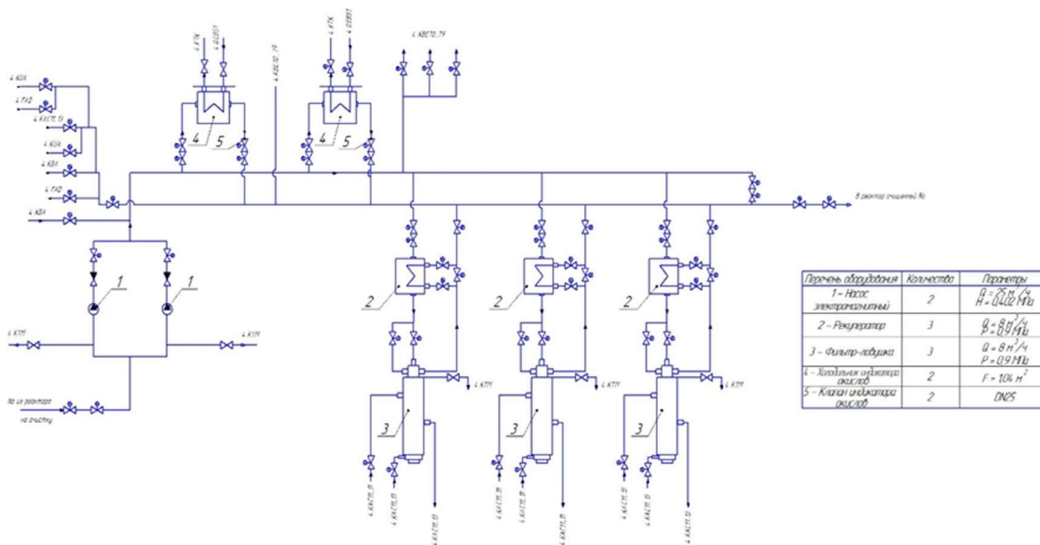


Рис. 1. Система очистки натрия первого контура

Подпитка реактора натрием производится через систему очистки на остановленном реакторе. Натрий подается насосом из бака первого контура, проходит через фильтр-ловушку и далее идет в трубопровод возврата натрия после очистки. Охлаждение фильтр-ловушек осуществляется воздухом, который циркулирует по замкнутому контуру, индивидуальному для каждой фильтр-ловушки. Тепло из воздушного контура отводится в теплообменниках технической водой. Контроль за качеством натрия ведется с помощью системы индикации окислов, она имеет рабочий и резервный контуры. Каждый контур индикации состоит из клапана индикатора окислов, холодильника индикатора окислов. Натрий в контур индикации окислов подается насосами системы очистки. Охлаждение натрия воздухом ведется до момента прекращения расхода окислов через клапан-индикатор. По данным замера клапана-индикатора принимается решение о необходимости проведения очистки. Чистым считается натрий, температура закипания которого составляет $120^{\circ}C$. После клапана-индикатора натрий возвращается в трубопровод возврата из системы очистки теплоносителя I контура в реактор.

Система очистки натрия, не смотря на всю ее сложность, соответствует всем требованиям радиационной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.А. Кузнецов, В.М. Поплавский. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: МЭИ, 2012. 632 с.

A. V. Zamyatina A. I. Valtseva, K.M. Karamazova
Ural Federal University, Ekaterinburg

SODIUM PURIFICATION SYSTEM OF THE FIRST CIRCUIT OF THE BN-800 REACTOR OF THE BELOYARSKAYA NUCLEAR POWER PLANT

СТРУКТУРА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ УГЛЕРОДНЫХ ФУЛЛЕРЕНОВЫХ НАНО-«ЛУКОВИЦ»

«Луковичные» фуллерены («nano-onions» [1-3]) представляют собой concentрические кристаллические структуры, в которых фуллереновые молекулы вложены друг в друга подобно слоям луковицы [1]. Наименьшую оболочку внутри луковичных фуллеренов образует фуллерен C_{60} с диаметром 1.1 нм, следующая за ней оболочка - C_{240} диаметром 1.74 нм, затем C_{540} диаметром 2.74 нм и далее, вплоть до «гигантских» молекул диаметром 30-70 Å [1, 2].

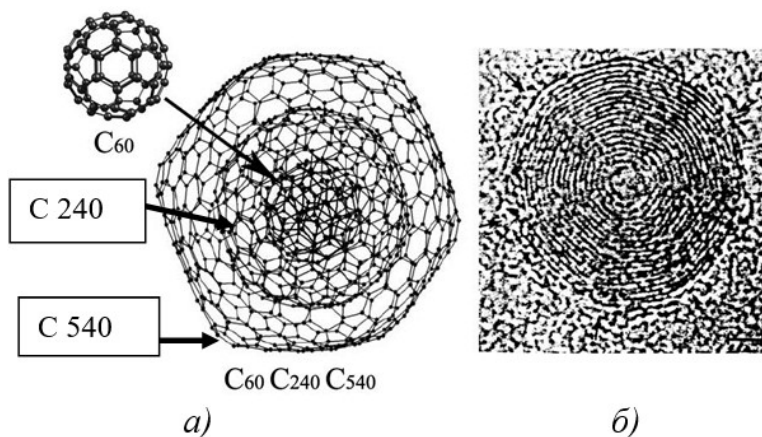


Рис. 1. а) Модель фуллерена C_{60} и «луковичного» фуллерена $C_{60}C_{240}C_{540}$ [3];
б) электронно-микроскопическое изображение двадцатислойной фуллереновой «луковицы» [1]

Несмотря на то, что луковичные наноструктуры углерода, как и сами фуллерены были обнаружены раньше (1985 г) чем нанотрубки (1991), они гораздо менее изучены – нам не удалось найти каких-либо данных по теплопроводности углеродных многослойных фуллеренов. Углеродные многослойные фуллерены перспективны в качестве компонентов функциональных материалов электрического, антифрикционного, радиотехнического (поглотителя СВЧ-излучения) назначения и для производства синтетических алмазов. Теплопроводность является одним из необходимых параметров для сертификации и использования материалов.

(*) Ю.П. Заричняк, zarich4@gmail.com

На модели структуры «луковичных» фуллеренов с помощью методов теории обобщенной проводимости, проведены приближенные оценки теплопроводности углеродных многослойных «луковичных» фуллеренов с числом слоёв от 2 до 20.

Результаты расчётов представлены на рис. 2.

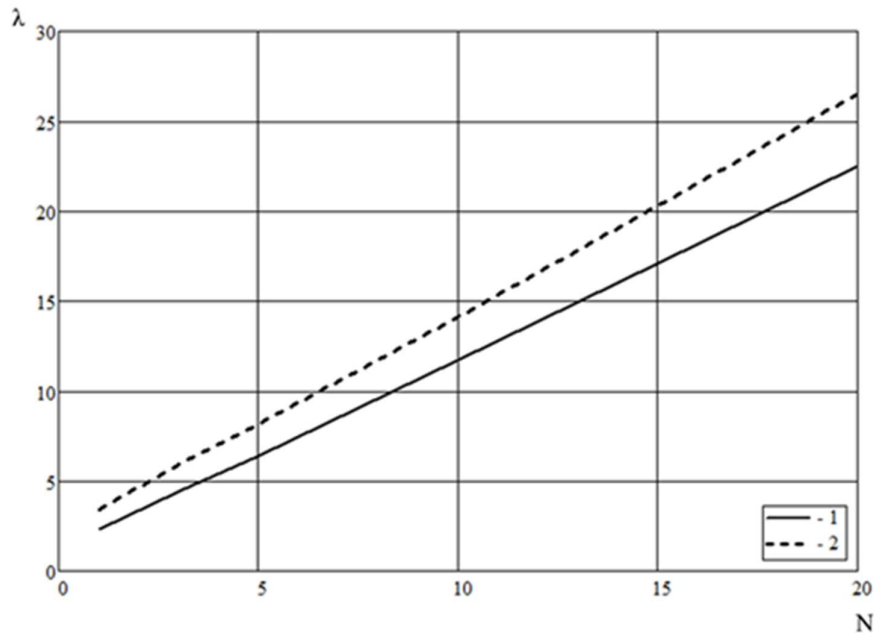


Рис. 2. Зависимость эффективной теплопроводности λ , Вт/(м·К) многослойных углеродных «луковичных» фуллеренов от числа слоев N:
 1 – при теплопроводности графена $\lambda_{G1} = 4400$ Вт/(м·К);
 2 – при теплопроводности графена $\lambda_{G1} = 6500$ Вт/(м·К)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кац Е.А. Леонард Эйлер и современные представления о молекулярной структуре фуллеренов. Энергия: экономика, техника, экология, 2004, № 2, с. 51–57, №3, с. 52-57, № 4, с. 57–62.
2. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены: учебное пособие по специальности 210602 "Наноматериалы". М.: Логос, 2006. 376 с.
3. Альес М.Ю., Евстафьев О.И., Карпов А.И. Молекулярно-динамическое моделирование фуллереновых структур // Химическая физика и мезоскопия. 2013, Т. 15, № 1. С. 41–46.

Yu.P. Zarichnyak¹, V.A. Ivanov², A.A. Marova¹, N.V. Pilipenko¹
¹ITMO University, Saint Petersburg, Russia,
²Institute of Physical-Engineering Problem of North, Yakutsk, Russia

THE STRUCTURE AND THERMAL CONDUCTIVITY OF CARBON FULLERENE NANO-ONIONS

ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЯГА ВОДЫ ЧЕРЕЗ ГЛАДКОТРУБНЫЙ ПУЧОК ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАЖДЕНИЯ

В настоящее время развиваются технологии подводной добычи природного газа, в которых используется стационарное глубоководное оборудование, основными элементами которого являются комплексы газоперекачивающих компрессорных станций (ГКС) [1, 2]. Для охлаждения газа в номинальных условиях эксплуатации, а также в целях противопомпажной защиты в состав ГКС включаются теплообменные аппараты с гладкотрубными пучками. На протяжении ряда лет авторами решались задачи, связанные с исследованием течения воды и теплоотдачи для различных конфигураций гладкотрубного пучка, находящегося в безграничном пространстве (см., например, [3]). В реальных условиях в состав ГКС входит многочисленное оборудование. При этом ограниченные габариты платформы ГКС делают условия течения вблизи пучка, существенно отличающимися от случая, когда пучок окружен только водным пространством. Целью настоящей работы является исследование влияния загромождения пространства вблизи трубного пучка на течение и теплоотдачу воды.

Рассматривается модельный шахматный пучок, состоящий из шести вертикальных рядов, а также подводящего и отводящего коллекторов (рис. 1а). Вертикальный ряд представляет собой многократно изогнутую трубу диаметром $D = 0.02$ м. Ряд включает 12 прямолинейных участков с поворотами. Высота трубного пучка – 0.8 м. Границы расчетной области удалены во всех направлениях на расстояние $50D$ от пучка. В качестве ограждающих трубный пучок элементов приняты плоские твердые стенки, удаленные на некоторое расстояние от него. Рассмотрены три варианта расположения стенок относительно пучка: 1 – пучок огражден четырьмя стенками, лежащими в x - и y -плоскостях (рис. 1а), 2 – двумя стенками в y -плоскости, 3 – двумя стенками в x -плоскости. Вариант 4 – случай, когда ограничивающих стенок нет.

Нестационарное течение воды моделировалось уравнениями Навье-Стокса, эффекты плавучести учитывались в приближении Буссинеска. Температура воды на удалении от пучка принималась равной 20°C , температура стенок задавалась постоянной и равной 30°C .

В расчетах использовались неструктурированные сетки размерностью 44.3 млн ячеек. Численное решение получено с помощью пакета ANSYS Fluent. Расчеты проведены с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

^(*) Н.Г. Иванов, ivanov_ng@spbstu.ru

Показано, что наличие загромождающих стенок существенно изменяет структуру течения в межтрубном пространстве, тем самым перераспределяя теплосъем по высоте пучка, что можно отметить по графикам теплоотдачи от прямолинейных участков труб (рис. 1б). Однако, интегральный теплосъем с поверхностей трубного пучка при этом практически не изменяется (таблица 1): максимальные отличия в значениях теплосъема составляют 11% и наблюдаются для вариантов 1 (23.5 кВт) и 2 (21 кВт).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00669.

Таблица 1. Значения интегрального теплосъема

Вариант	1	2	3	4
Q , кВт	23.5	21	21.1	22.2

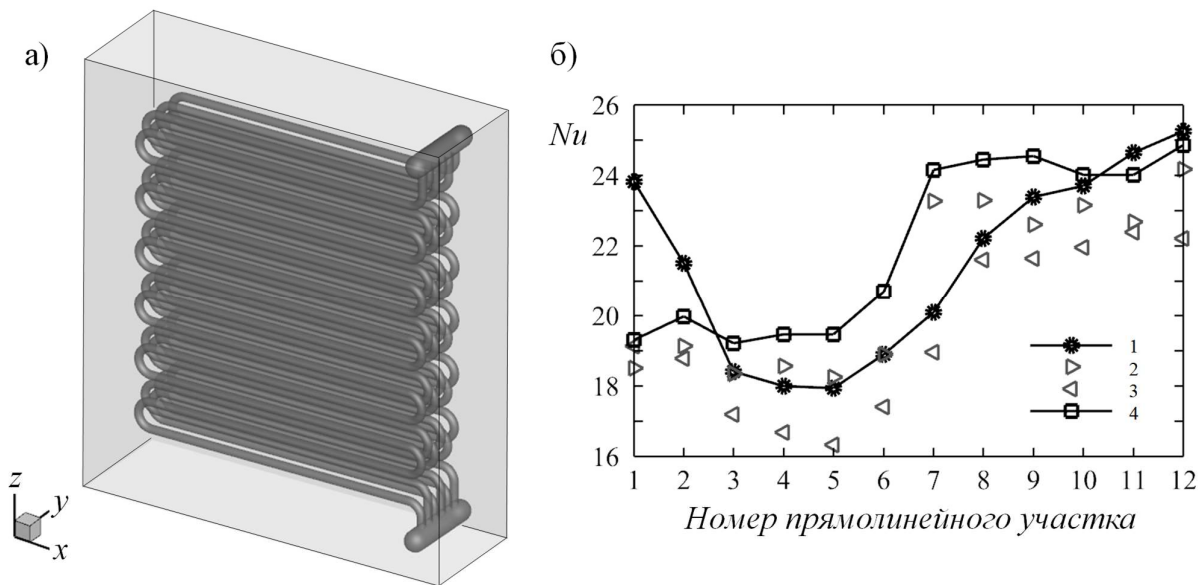


Рис. 1. а) Геометрия расчетной области; б) теплоотдача на прямолинейных участках третьего вертикального ряда труб для различных вариантов ограждения пучка

ЛИТЕРАТУРА

1. Bai Y., Bai Q. Subsea Engineering Handbook. Gulf Professional Publishing, 2012. 960p.
2. Fantoft R., Subsea gas compression – challenges and solutions // Offshore Technology Conference, 2-5 May 2005, Houston, Texas // OTC paper №17399, 2005, pp.1-6.
3. Засимова М.А., Иванов Н.Г., Рис В.В., Щур Н.А. Теплопередача в гладкотрубном шахматном пучке, погруженном в обширный водный бассейн // Теплофизика высоких температур. 2018. Том 56. № 5. С. 777-787.

M.A. Zasimova, N.G. Ivanov, A.D. Podmarkova, V.V. Ris, N.A. Tshur
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

EFFECT OF THE BOUNDING WALLS CONFIGURATION ON DRAFT WATER FLOW THROUGH STAGGERED TUBE BANK

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК СТРУИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В СНОСЯЩЕМ ПОТОКЕ ГАЗА

Исследование распространения струи жидкого топлива в сносящем потоке газа важно для оптимизации параметров смесеобразования в двигателях с впрыском топлива напрямую в камеру сгорания. Ранее авторами были проведены экспериментальные исследования на базе лаборатории кафедры Технической термодинамики в Университете Фридриха-Александра в Германии и предложена модель распространения струи жидкого топлива в поперечном набегающем воздушном потоке [1]. Модель основана на модели распространения турбулентной струи газа при условии постоянства импульса в ее поперечном сечении [2]. Исследуемая струя является двухфазной, в связи с чем угол раствора струи был взят из эксперимента в отсутствие набегающего потока и составлял 6° .

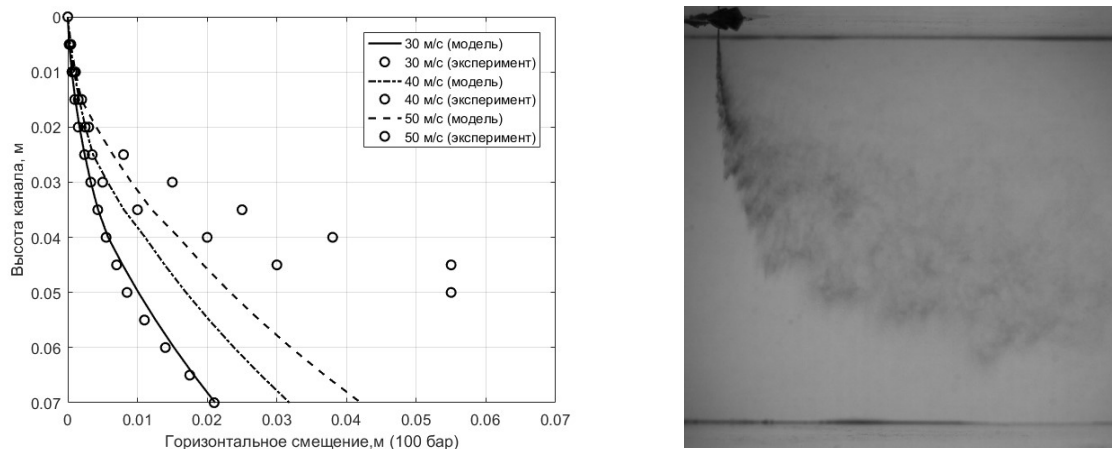


Рис. 1. Горизонтальное смещение струи при высоких скоростях набегающего потока: слева – сравнение модели и эксперимента при скоростях набегающего потока 30-50 м/с; справа – фотография струи при скорости потока 40 м/с

Предложенная модель показывает хорошее совпадение с экспериментальными данными при низких скоростях набегающего потока 5-25 м/с. Однако при высоких скоростях (30-50 м/с) совпадение является неудовлетворительным (рис.1).

Предложенная ранее модель оперирует средней скоростью частиц топлива в каждом сечении струи (рис.2а), однако известно, что действительный профиль

(*) Т.С. Зуева, zuevats-1993@yandex.ru

скорости подчиняется нормальному закону распределения Гаусса. В связи с этим авторами предлагается уточнённая модель (рис. 2б), в которой распространение струи описывается с помощью движения двух (или более) выделенных объемов струи, каждый из которых будет двигаться независимо от другого, по своей траектории и со своей средней скоростью [2].

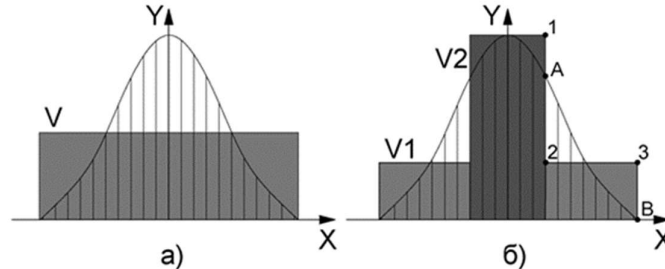


Рис. 2. Разбиение струи на объёмы: а) один объём движется с усреднённой скоростью; б) два объёма движутся с различными скоростями

Разбиение одного выделенного объема на два осуществляется решением системы уравнений:

$$V1 + V2 = \int_0^V C \cdot \exp(-\sigma \cdot x^2) dx \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum (y_i - f(x_i))^2 \quad (2)$$

Уравнение (1) характеризует равенство выделенных объемов струи V1 и V2, и объема под кривой, описываемой функцией: $f(x) = C \cdot \exp(-\sigma \cdot x^2) dx$. Уравнение (2) представляет собой применение метода наименьших квадратов для определения координат точек 1, 2 и 3. Применение уточнённой модели позволяет значительно лучше описать результаты экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуева Т.С., Welss R., Wensing M, Гаряев А.Б. Модель распространения струи жидкого топлива при впрыске в цилиндр двигателя внутреннего сгорания // Энергосбережение – теория и практика: Труды девятой международной школы-семинара молодых учёных и специалистов (Москва, 5 – 12 октября 2018 г.) – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С.53 – 59.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб.пособ.: для вузов. В 10 т. Т. VI Гидродинамика. – 5-е изд., стереотип. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 736 с.

T.S. Zueva¹, A.B. Garyaev¹, L. Weiss²

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,

²Friedrich-Alexander University, Germany

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION OF LIQUID FUEL SPRAY CHARACTERISTICS UNDER CROSS-FLOW CONDITIONS

**ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРАКТИКУМА
ПО РЕШЕНИЮ МНОГОМЕРНЫХ ЗАДАЧ
ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОФИЗИКИ**

В настоящее время методы и средства вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) широко используются как в научно-исследовательской деятельности, так и в инженерной практике. Подготовка инженеров-исследователей, специализирующихся на решении задач гидродинамики и теплофизики, несомненно должна включать всестороннее изучение и практическое освоение принципов работы современного CFD-инструментария. В докладе обобщается накопленный преподавателями кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ многолетний опыт построения и реализации дисциплин, направленных на практическое освоение вычислительных методов и изучение особенностей программных пакетов для решения фундаментальных и прикладных задач механики жидкости и газа.

Знакомство с CFD-технологиями студенты, обучающиеся по направлению подготовки «Прикладные математика и физика», начинают во втором семестре третьего курса бакалавриата. Дисциплина «Введение в компьютерный инжиниринг» стоит в учебном плане параллельно с изучением второй части курса «Механика жидкости и газа». Таким образом, входящие в ее программу вычислительные лабораторные работы направлены как на предварительное освоение особенностей работы с вычислительным пакетом общего назначения, так и на методическое подкрепление теоретического изучения динамики вязкой жидкости. При проведении вычислительных лабораторных работ используется пакет FLOS (FLOW Studio) [1], включающий препроцессор, вычислительное ядро SINF [2, 3] и встроенный постпроцессор. В пакете используются блочно-структурированные сетки, что оказывается полезным на этапе начального освоения студентами методов инженерного анализа в гидродинамике. Рассматриваются только стационарные ламинарные двумерные течения вязкой несжимаемой жидкости. В первой части курса проводится моделирование внутренних течений (течение в прямоугольной полости с движущейся крышкой, течения в начальном участке прямого канала, в участке канала с 90-градусным поворотом и в каналах переменного сечения). Вторая часть курса посвящена моделированию внешних задач (развитие пограничного слоя на плоской пластине, обтекание круглого цилиндра и симметричного профиля). Следует отметить, что расчет обтекания круглого цилиндра проводится в двумерной

^(*) А.М.Левченя, levchenya_am@spbstu.ru

нестационарной постановке, а обработка результатов расчетов включает элементы спектрального анализа колебаний и подготовку анимации полей скорости.

На четвертом курсе бакалавриата в рамках дисциплины «Программные средства вычислительной гидродинамики и теплофизики» студенты знакомятся с пакетом общего назначения ANSYS Fluent. Для препроцессорной подготовки используются пакеты ANSYS DesignModeler и ANSYS Meshing, а в качестве постпроцессора – CFD-Post. Большая часть вычислительных лабораторных работ посвящена численному моделированию течений газа (течение в сопле Лавая на расчетных и нерасчетных режимах, обтекание ромба сверхзвуковым потоком). Для иллюстрации возможностей решения задач на неструктурированных сетках, в том числе большей степени автоматизации при их построении, рассматриваются течения жидкости в условиях усложненной геометрии. Кроме этого, дополнительные возможности пакета демонстрирует решение задачи однопараметрической оптимизации (на примере серии расчетов обтекания круглого цилиндра с пластиной в следе за ним).

Полученный студентами в рамках учебных курсов начальный опыт использования пакетов прикладных программ вычислительной гидродинамики позволяет быстро включиться в выполнение исследовательских расчетов при подготовке выпускных бакалаврских работ, а также закладывает основу для успешного обучения в магистратуре, в том числе по реализуемым в СПбПУ в рамках того же направления магистерским программам «Модели и высокопроизводительные вычисления в физической гидрогазодинамике» и «Экспериментальная и вычислительная теплофизика».

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Д.К., Смирнов П.Е., Якубов С.А., Балашов М.Е. Комплекс программ для создания блочно-структурированных сеток // Программные продукты и системы, 2012, № 2, с.32-35.
2. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости № 2 (36). Изд-во Политехнического ун-та. СПб, 2004, с.70-81.
3. Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Якубов С.А. Параллелизация гидродинамических расчетов на блочно-структурированных сетках // Программные продукты и системы, 2009, № 3, с.148-150.

N.G. Ivanov, A.M. Levchenya
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

ON DEVELOPMENT OF PRACTICAL COURSES AIMED AT NUMERICAL MODELING OF 2D/3D FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER PROBLEMS

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ РАЗНОГО УРОВНЯ В ВУЗЕ

Развитие университетов России и повышение их конкурентоспособности в международном масштабе предполагает создание образовательных программ (ОП), сопоставимых с аналогами, предлагаемыми в лучших университетах мира. Для их создания необходимо понимать, каким требованиям они должны соответствовать и при каких условиях эти требования могут быть успешно реализованы в учебном процессе.

Формирование требований к современным ОП высшего образования осуществлялись исходя из 2 активно развивающихся подходов к инженерному образованию. Первый из них – это концепция IGIP [1, 2]. Второй – это стандарты практико-ориентированного обучения CDIO [3], которые позволяют выделить ряд требований к ОП, которые успешно реализуются в подготовке современных выпускников. На этой основе для совершенствования образовательного процесса в Уральском федеральном университете была разработана модель требований к ОП нового поколения, а затем проведено исследование возможности ее использовать в разных направлениях и профилях профессиональной подготовки. Все требования разделены на универсальные, которые применимы для всех профилей, и специальные, необходимые только для программ определенной направленности.

По мнению авторов, универсальными требованиями к ОП нового поколения являются: 1) Компетентностный подход к построению образовательной программы [4]; 2) Возможности ОП для индивидуализации обучения; 3) Интерактивность реализации ОП [5]; 4) Технологичность построения ОП [6]; 5) Информационно-программная оснащенность ОП; 6) Удаленная реализация ОП; 7) Постоянная обновляемость ОП.

К специальным требованиям к ОП нового поколения относятся: 8) Практико-ориентированность; 9) Вовлеченность в ОП предприятий-партнеров; 10) Проектная ориентированность контента и методологии реализации ОП [7]; 11) Интегрированность научно-исследовательской деятельности в ОП.

Для определения значимости основных требований к ОП нового поколения и уровня готовности к их реализации были опрошены сотрудники университета: преподаватели-эксперты (53) и молодые преподаватели (72). Эксперты-преподаватели, имеющие опыт образовательной деятельности более 15-ти лет и

^(*) Л.В. Плотников, leonplot@mail.ru

участвовавшие в разработке новых ОП. К молодым относились преподаватели не старше 30-ти лет, имеющие опыт образовательной деятельности менее 5-и лет и занимающиеся научной работой.

Таким образом, авторами предложена модель ОП нового поколения, включающая 11 требований, отражающих объективные потребности внешней среды к выпускникам университета. Обеспечить реализацию этих требований в образовательном процессе университета можно путем преодоления недостатков, связанных: с педагогической квалификацией преподавателей; финансированием материально-технической базы учебного процесса; образовательной культурой университета, сформировавшейся в предыдущие десятилетия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dobrovska D. Mission of the International Society for Engineering Pedagogy IGIP // *Technology of education*, 2011. V. 19(9). P. 5-18.
2. Zafoschnig A. The Development of the new ING.PAED.IGIP Curriculum into an Umbrella for Modularised National and Regional Engineering Education Curricula // *Int. J. Engineering Pedagogy*, 2014. V. 4(1). P. 32-36.
3. Crawley E.F., Malmqvist J., Östlund S., Brodeur D., Edström K. *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach*. New York: Springer. 2014. 319 p.
4. Mu S., Gnyawal D.R. Developing Synergistic Knowledge in Student Groups // *J. Higher Education*, 2003. V. 74(6). P. 689-711.
5. Határ C. New trends in education // *Technology of education*, 2013. V. 21(3). P. 3-7.
6. De Oliveira M.J. Technology, Literacy and Learning: A Multimodal Approach (review) // *J. Higher Education*, 2009. V. 80(3). P. 356-358.
7. Isaev A.P., Plotnikov L.V., Fomin N.I. Technology of interdisciplinary open-ended designing in engineering education // *IOP Conf. Ser: J. Physics*, 2017. V. 891. 012362.

A.P. Isaev, L.V. Plotnikov
Ural Federal University

EDUCATIONAL PROGRAMS IMPROVEMENT DIRECTIONS OF DIFFERENT LEVELS IN HIGH SCHOOL

С.А. Исаев^{1, 4, (*)}, А.И. Леонтьев², О.О. Мильман³,
 Д.В. Никущенко⁴, А.Г. Егорова⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

³ЗАО «Турбокон», Калуга,

⁴Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ОДНОРЯДНЫМИ НАКЛОНЕННЫМИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫМИ ЛУНКАМИ И ВЫСТУПАМИ

Интенсификация ламинарного теплообмена в межреберном пространстве воздушных конденсаторов [1] представляет важную практическую и научную проблему. Для ее решения применяются технологии поверхностных вихрегенераторов [2]. Акцент делается на нанесении наклоненных овально-траншейных лунок (ОТЛ) [3-8], применение которых в узких каналах позволяет значительно повысить их тепловую эффективность при отстающем возрастании гидравлических потерь. Оказалось, что относительное удлинение овальных лунок имеет существенное значение и целесообразно выбирать длину ОТЛ порядка 4 (в отношении к ширине). Угол наклона – 45°. Глубина лунки является одним из важных факторов обеспечения тепловой и теплогидравлической эффективности узких облуненных каналов. Наиболее значительные показатели достигаются при глубинах 0.3-0.4 высоты канала. Число Рейнольдса, оцененное по среднemasсовой скорости и высоте канала, варьируется в пределах 10^2 -1500.

На Рис. 1 показан один вариант предложенного пакета двухрядных наклоненных ОТЛ на ребре воздушного конденсатора.

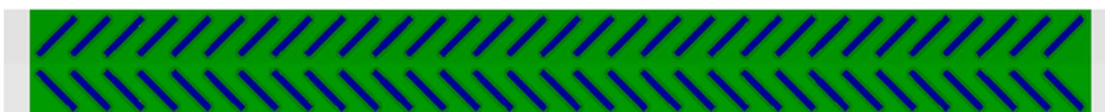


Рис. 1. Пакет из двухрядных наклоненных овально-траншейных лунок, нанесенных на ребро воздушного конденсатора

При конструировании рельефа важную роль играет плотность нанесения ОТЛ. В проведенных исследованиях последних лет [6-8] в основном рассматривались рельефы с редко расположенными лунками на стабилизированном участке конвективного теплообмена в облуненном канале при $Re=10^3$. Выделялась периодическая секция узкого канала с расположенной в центре нагретой стенки наклоненной ОТЛ. Открыт эффект полуторакратного ускорения ламинарного потока и почти двукратного роста теплоотдачи.

(*) С.А. Исаев, isaev3612@yandex.ru

В данной работе акцент делается на анализе ламинарного течения воздуха и теплообмена в узких облуненных каналах конечного удлинения. Нанесение лунок сопровождается появлением выступов с другой стороны ребра. Высокие выступы приводят к развитию нестационарного течения в канале и к росту гидравлических потерь. При тепловом проектировании канала с поверхностными вихрегенераторами относительная высота выступа выбирается в пределах 0.1 высоты канала. Предлагаются решения по пакетам воздушных конденсаторов, набранных из облуненных ребер и промежуточных пластин с переменными зазорами между ними и пластинами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-08-00148).

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров В.А., Мильман О.О. Конденсаторы паротурбинных установок. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013. 560с.
2. Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; под общей ред. акад. А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350с
3. Isaev S.A., Leonardi E., Timchenko V., Usachov A.E. Vortical investigation of heat transfer in microchannels with oval dimples // Heat Trans. Research. 2010. Vol. 41. No. 4. P. 413-424.
4. Isaev S.A., Leontiev A.I., Kornev N.V., Hassel E., and Chudnovskii Ja.P. Heat transfer intensification for laminar and turbulent flows in a narrow channel with one-row oval dimples // High Temp. 2015. Vol.53. No.3 P. 375-386.
5. Isaev S.A., Leontiev A.I., Gul'tsova M.E., and Popov I.A. Transformation and intensification of tornado-like flow in a narrow channel during elongation of an oval dimple with constant area // Techn. Phys. Letters 2015. Vol. 41. No.6. P.606-609.
6. Isaev S.A., Baranov P.A., Leontiev A.I., Popov I.A. Intensification of a laminar flow in a narrow microchannel with single-row inclined oval-trench dimples // Tech. Phys. Letters. 2018. Vol. 44. No. 5. P. 398-400.
7. Isaev S.A., Leont'ev A.I., Mil'man O.O., Sudakov A.G., Usachov A.E., Gul'tsova M.E. Intensification of heat exchange in laminar vortex air flow in a narrow channel with a row of inclined oval trenches // J. Eng. Phys. and Thermophys. 2018. Vol. 91. No. 4. P.963-974.
8. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // Int. J. Heat and Mass Trans. 2019. Vol. 134. P. 338-358.

S.A. Isaev¹, A.I. Leontiev², O.O. Milman³, D.V. Nikushchenko⁴, A.G. Egorova⁴

¹Saint-Petersburg State University of Civil Aviation,

²Baumann Moscow State Technical University,

³ZAO "Turbokon", Kaluga,

⁴Saint-Petersburg State Marine Technical University

ENERGY-EFFICIENT SURFACE OF AIR CAPACITORS WITH SINGLE ROW INCLINED OVAL-TRENCH DIMPLES AND PROTRUSIONS

В.О. Каледин^{*)}, Е.А. Вячкина, А.Е. Гилёва,
Е.С. Вячкин, Д.А. Галдин, А.Д. Ульянов
Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Кемеровский государственный университет»

МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Рассматривается математическая модель теплового равновесия отапливаемого здания, включающая теплообмен внешней среды со стенами здания и теплообмен помещения со стенами и отопительными конвекторами.

Поддержание температурного режима в отапливаемых зданиях требует работоспособного состояния отопительных систем. Серьезное влияние на температурный режим оказывает как температура отопительных конвекторов, так и состояние внешних стен. В связи с этим актуальной задачей представляется моделирование теплообменных процессов в помещении.

Процессы теплообмена, происходящие в отапливаемом здании, можно представить в виде схемы на рис. 1. Рассмотрим подробнее эти процессы.

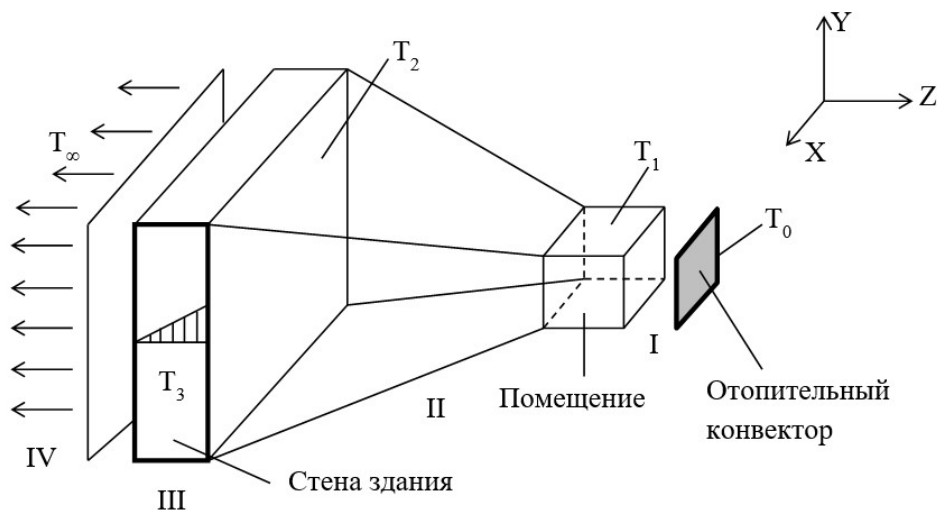


Рис. 1. Схема теплообменных процессов

Плотность теплового потока с поверхности конвектора в помещении, температура в котором распределена равномерно, определяется физическим законом конвекции:

$$q = h(T_0 - T_1) \quad (1)$$

где h – коэффициент свободной конвекции в воздухе, Вт/(м²·К);

^{*)} В.О. Каледин, SedovaEA@yandex.ru

T_0 – средняя интегральная температура конвектора;

T_1 – температура воздуха в помещении.

Считая коэффициент свободной конвекции постоянным, найдём мощность, отдаваемую конвектором, интегрированием по площади отопительного конвектора S_k :

$$N = h \int_{S_k} (T_0 - T_1) dS_k = h \cdot S_k (T_0 - T_1) \quad (2)$$

где средняя интегральная температура конвектора:

$$T_0 = \frac{1}{S_k} \int T dS_k.$$

От помещения внутренней стене здания передается тепловой поток, который можно определить аналогично (2):

$$N = h \cdot S_{с.пом} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

где $S_{с.пом}$ – площадь стены помещения, через которую происходит теплопередача.

Процесс теплопроводности через стену здания (номер III на рис. 1) определяется согласно закону Фурье. Плотность теплового потока через стену равна:

$$q = a \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

где a – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Найдём мощность, передаваемую через стену толщиной H , интегрированием по площади стены S :

$$N = a \int_{S_{стен}} \frac{\partial T}{\partial x} dS_{стен} = a \int_{S_{стен}} \frac{T_2 - T_3}{H} dS_{стен} = a \cdot S_{стен} \frac{T_2 - T_3}{H} \quad (5)$$

где $S_{стен}$ – площадь стены здания.

Последним этапом (IV на рис. 1) будет процесс теплоотдачи от внешней стены здания в окружающую среду. Количество теплоты, выделившейся на улицу, будет равно:

$$N = h \cdot S_{внеш.стен} \cdot (T_3 - T_\infty) \quad (6)$$

где $S_{внеш.стен}$ – площадь внешней стены здания.

Таким образом, получена математическая модель процессов теплообмена в отапливаемом помещении, учитывающая как температуру конвекторов отопления, так и влияние внешней среды.

Поддержана НФИ КемГУ (грант № 3-05/1ГР-18).

V.O. Kaledin, E.A. Viachkina, A.E. Gileva,
E.S.Viachkin, D.A. Galdin, A.D. Ulyanov
Novokuznetsk Institute (Branch) of Kemerovo State University

HEAT AND MASS TRANSFER MODEL IN HEATED SPACES

ПЛЁНОЧНОЕ КИПЕНИЕ НЕДОГРЕТЫХ РАСТВОРОВ ЭТАНОЛА И ИОДИДА НАТРИЯ

В настоящее время в мировом научном сообществе всё больший интерес проявляется к интенсивному режиму теплообмена, зачастую наблюдаемому при охлаждении высокотемпературных тел в недогретой воде. Этот процесс примечателен схлопыванием паровой плёнки вокруг охлаждаемого тела при температуре поверхности, превышающей критическую температуру жидкости. Поэтому характерные КТО имеют настолько высокие значения, что некоторыми специалистами это явление ошибочно принимается за пузырьковый режим кипения [1].

Целью исследований, ведущихся на кафедре инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» в научной группе Ягова В.В., является выявление закономерностей и механизмов наступления описанного интенсивного процесса теплообмена при плёночном кипении недогретой жидкости, именуемого микропузырьковым кипением [2].

Изучение этого интенсивного процесса теплообмена или же особого микропузырькового режима кипения может прояснить природу возникновения парового взрыва - опасного явления, встречающегося в аварийных ситуациях в атомной энергетике, целлюлозно-бумажной промышленности, металлургии. Возможность повысить прочностные свойства стальных изделий делает исследование интересным и для специалистов в области технологии закалки, поскольку, как известно, при быстром охлаждении происходит резкое упрочнение материала вследствие лавинного образования дислокаций и их «замораживания» [3].

Для закалки сталей нередко используются водные растворы солей, скорость охлаждения в которых значительно быстрее, чем в чистой воде. По этому примеру нами было решено провести эксперименты по охлаждению 40 мм шара из нержавеющей стали в недогретом этиловом растворе солей при атмосферном давлении. Использование таких растворов вместо водных позволяет понизить начальную температуру шара, при которой охлаждение начинается с устойчивого плёночного кипения. Изучение влияния концентрации солей в этаноле на наступление интенсивного режима теплообмена тем более интересно, что получение микропузырькового кипения при охлаждении высокотемпературных металлических сфер в чистом этаноле при тех же условиях эксперимента невозможно [4]: устойчивое плёночное кипение

^(*) П.К. Канин, kaninpk@live.com

завершается при температурах охлаждаемой поверхности около температуры предельного перегрева этанола и последовательно сменяется переходным и пузырьковым режимами кипения.

В докладе описаны результаты экспериментов по охлаждению полированного 40 мм шара из нержавеющей стали в 1, 5 и 10 % этиловом растворе NaI при температуре жидкости +30 °С при атмосферном давлении. В результате экспериментов был обнаружен рост температуры, при которой происходит переход от устойчивого плёночного кипения к интенсивному режиму теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liscic B. et al. Quenching Theory and Technology. Boca Raton: CRC Press Book, 2010. P. 725.
2. Aziz S., Hewitt G. F. and Kenning D.B.R. Heat transfer regimes in forced-convection film boiling on spheres // Conference proceedings of 8th Int/ Heat Transfer Conf., 1986. V. 5, P. 2149.
3. Кобаско Н.И. Закалка сталей в жидких средах под давлением. Киев: Наук. думка, 1980. 208 с.
4. Yagov V.V., Zabiroy A.R. and Kanin P.K. Heat transfer at cooling high-temperature bodies in subcooled liquids // Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2018. V. 126-A. P. 823.

P.K. Kanin, A.R. Zabiroy, V.V. Yagov
National Research University "MPEI"

POOL FILM BOILING OF SUBCOOLED SOLUTIONS OF ETHANOL AND SODIUM IODIDE

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ В ТОПКАХ С ПРЯМОТОЧНЫМИ ГОРЕЛКАМИ ДЛЯ КОТЛОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

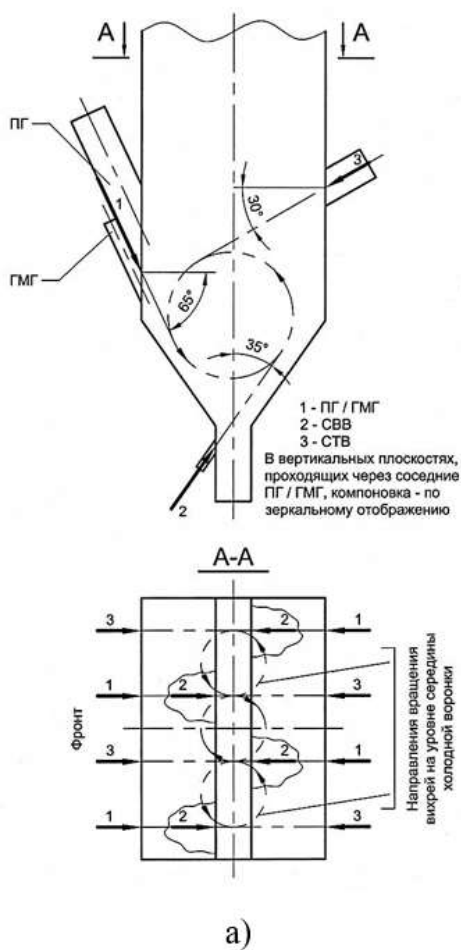
Основной целью исследований является разработка и обобщение принципов оптимизации аэродинамики топочного объема паровых котлов, разработка и исследование новых решений и схем по организации прямооточно-вихревого факела (при ступенчатом подводе окислителя к топливу) для снижения выбросов оксидов азота, повышения надежности и расширения диапазона несения паровых нагрузок. Была разработана компоновка прямооточных горелок и сопел на котле большой мощности с твердым шлакоудалением (рис. 1, а), работающем на каменном угле марки Т [1].

Экспериментальные исследования схемы сжигания включают следующие этапы: на физических моделях (рис. 1, б) проводится искровое моделирование аэродинамики топочного объема, определение основных характеристик движения потоков, определение эжекционной способности струй; на математических моделях топки проводится исследование аэродинамики с учетом горения топлива [2]; полученный экспериментальный материал служит основой для позонных расчетов топочной камеры и тепловых расчетов котла на различных нагрузках. На рис. 1, в, приведены векторные поля скоростей, полученные при математическом моделировании аэродинамики топки.

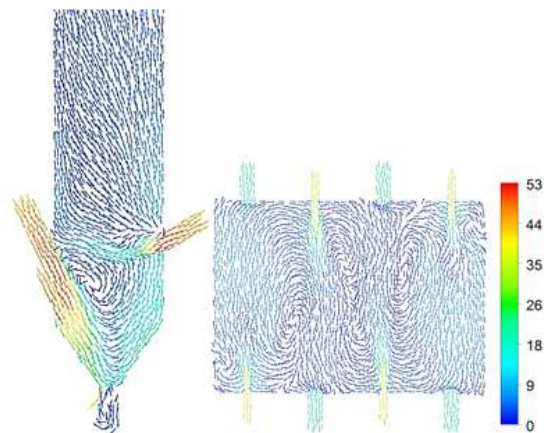
По результатам моделирования были определены основные параметры движения струй, истекающих из горелок (границы, эжекционная способность, прирост массы и др.). На математической модели были получены температурные поля в объеме топки. Были сформулированы основные принципы организации эффективного сжигания твердого топлива при применении прямооточных горелок: принятие минимально возможного избытка первичного воздуха; задержка подмешивания к факелу вторичного воздуха и подача третичного воздуха на завершающем этапе горения; обеспечение внутренней рециркуляции горячих топочных газов в корнях струй горелок; увеличение периметра зажигания; рассредоточение ядра факела по ширине, глубине и высоте топки; организация в объеме топки большого количества вихрей вращающихся в противоположных направлениях; исключение зон повышенного динамического давления факела на экранные трубы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10463 от 12 мая 2016 г.).

^(*) В.С. Киричков, KirichkovVS@mail.ru



б)



в)

Рис. 1. Компоновка горелок и сопел на модели топки (а), общий вид экспериментальной установки (б) и векторы скоростей, м/с, (в)
 ПГ – пылеугольные прямоточные горелки, ГМГ – газомазутные прямоточные горелки, СВВ – сопла вторичного воздуха; СТВ – сопла третичного воздуха

ЛИТЕРАТУРА

1. Volkov E.P., Arkhipov A.M., Prokhorov V.B., Chernov S.L. Increase of ecological safety, reliability and efficiency of coal-fired boilers // Probleme energeticii regionale, 2017. V. 1 (33). Pp. 45-53.
2. Filkoski Risto V., Petrovski Ilija J., Karas Piotr. Optimisation of pulverised coal combustion by means of CFD/CTA modelling // Thermal Science (An International Journal), 2006. V. 10. No. 3. Pp. 161-170.

V.S. Kirichkov, V.B. Prokhorov, S.L. Chernov, A.A. Kaverin,
 National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

INVESTIGATION OF THE INTERACTION OF TURBULENT JETS IN FURNACES WITH DIRECT-FLOW BURNERS FOR HIGH-POWER BOILERS

А.В. Кирюхин^{1,2, (*)}, Е.А. Лошкарева¹, А.В. Кондратьев²,
М.О. Корлякова³, В.О. Милосердов²

¹ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет
им. К.Э.Циолковского», г. Калуга,

²ЗАО «Научно-производственное внедренческое
предприятие «Турбокон», г. Калуга,

³ФВГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э.Баумана»,
Калужский филиал, г. Калуга

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ ВИБРАЦИИ ЧЕРЕЗ КОМПЕНСАТОР ТРУБОПРОВОДА ПУТЕМ ПОДАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Передача вибрации через компенсаторы трубопроводов с жидкостью характеризуется ее увеличением на два – три порядка по сравнению с компенсатором без жидкости в широком частотном диапазоне. Компенсатор является источником пульсаций давления и порождаемых пульсациями динамических сил при его вибрационном деформировании. Поэтому снижение структурной жесткости компенсатора часто не приводит к снижению передачи вибрации через него на этих частотах [1,2]. Экспериментально показано, что для снижения передачи вибрации через компенсатор возможно применение широкополосных активных систем гашения как динамических сил по его структуре, так и пульсаций давления рабочей среды внутри компенсатора. Получено широкополосное снижение динамических сил и пульсаций давления при помощи активных систем их гашения как при отдельной, так и при совместной работе в полосе частот от 10 до 175 Гц на величину более 15 дБ, как это показано на рисунке 1.

Работа выполнена в счет гранта РФФИ. Соглашение №16-19-10292 от 12 мая 2016 г. между Российским научным фондом и КГУ им. К.Э.Циолковского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирюхин А.В., Мильман О.О., Птахин А.В. Снижение передачи вибрации от энергетических установок активными методами // Теплоэнергетика, 2017г., № 12, с.58-66 (912-919),
2. A.V. Kiryukhin, O. O. Milman, A. V. Ptakhin, and L. N. Serezhkin // Test Results of an Active System for Reducing Vibration Forces and Pressure Pulsations//ISSN 1063-7850, Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, No. 12, pp. 1136–1138. Original Russian Text published in Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 2018, Vol. 44, No. 24, pp.38–44. (<http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=10>)

(*) А.В. Кирюхин, turbocon@kaluga.ru

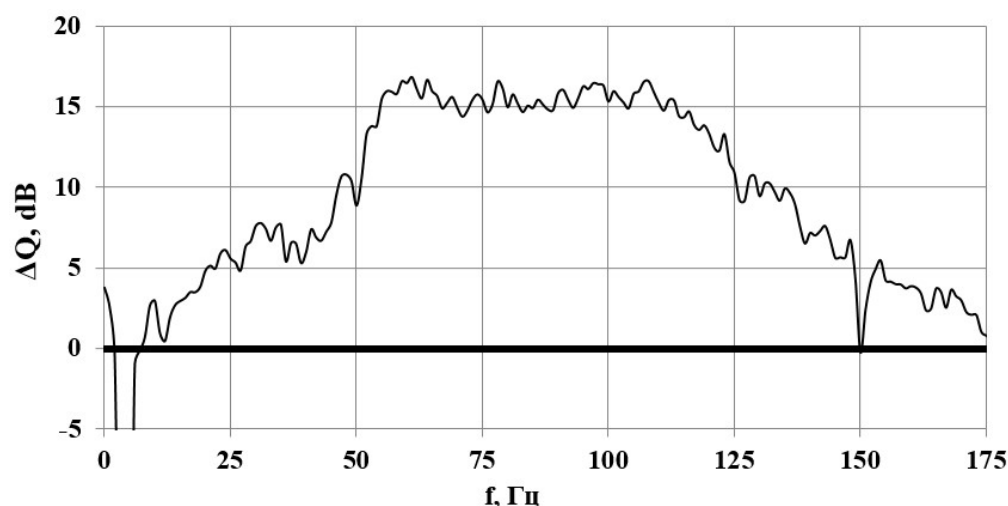


Рис. 1 Эффективность ΔQ (отношение силы до и после гашения) активного гашения передаваемой компенсатором трубопровода с жидкостью диаметром 100 мм вибрационной силы Q эллиптическими фильтрами первого порядка 30- 70 Гц, второго порядка 50-120 Гц и двумя резонаторами 130 Гц и 160 Гц в цепи обратной связи системы управления

A.V. Kiryukhin^{1,2}, E.A. Loshkareva¹, A.V. Kondratev²,
M.O. Korljakova³, V.O. Miloserdov²

¹Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky,

²Scientific Production Company "Turbokon",

³Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Kaluga branch

**THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE POSSIBILITY THE VIBRATION
TRANSMISSION IN PIPELINE COMPENSATOR BY MEANS
OF DYNAMIC FORCES REDUCTION AND PRESSURE PULSATIONS
DAMPING USING THE ACTIVE METHODS**

The paper was written on account of the Russian Science Foundation (the RSF) Grant. Agreement No. 16-19-10292 dated May 12, 2016 between the Russian Science Foundation and Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky.

А.В. Кирюхин^{1,2, (*)}, О.О. Мильман^{1,2}, Л.Н. Сережкин¹,
М.О. Корлякова³, В.О. Милосердов²
¹ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет
им. К.Э.Циолковского», г. Калуга,
²ЗАО «Научно-производственное внедренческое
предприятие «Турбокон», г. Калуга,
³ФВГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э.Баумана»,
Калужский филиал, г. Калуга

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТИ И СТРУКТУРЫ В ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ КОМПЕНСАТОРАХ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

На основе расчетных и экспериментальных исследований передачи вибрации через виброизолирующие компенсаторы трубопроводов с жидкостью показано, что влияние структурных и волновых резонансов, а также взаимодействие пульсаций рабочей среды со структурой может увеличивать передачу вибрации через компенсатор на два – три порядка и более с ростом частоты возмущения. При этом передача вибрации по трубопроводу становится определяющей по сравнению с опорной виброизоляцией энергетической установки [1,2]. Описываются физические и математические модели указанного явления, дается сопоставление расчета и эксперимента. Показаны способы использования найденного взаимодействия пульсации среды и структуры для уменьшения передачи вибрации в определенном частотном диапазоне. На рисунке 1 показано экспериментально полученное снижение передачи вибрации через сильфонный разгруженный компенсатор на частоте 110 Гц на два порядка, обусловленное воздействием пульсаций воды в противофазе с вибрацией структуры компенсатора. На частотах выше 230 Гц вода заметно увеличивает передачу вибрации и жесткость компенсатора S_v , которая определяется как отношение вибрационной силы на выходе компенсатора к амплитуде вибрации на его входе на заданной частоте возмущения.

Работа выполнена в счет гранта РНФ. Соглашение №16-19-10292 от 12 мая 2016 г. между Российским научным фондом и КГУ им. К.Э.Циолковского.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Kiryukhin, O.O. Milman, A.V. Ptakhin. A Search for the Physical Principles of Improving the Power Unit Pipeline Expansion Joint with Fluid Vibro-Isolating Properties. Ecology, Int.J. of Applied Engineering Research. Vol. 11, N.23 (2016). pp. 11176-11183. (<https://www.ripublication.com/Volume/ijaerv11n23.htm>)

(*) А.В. Кирюхин, turbocon@kaluga.ru

2.A.V. Kiryukhin, O.O. Milman, A.V. Ptakhin, L.N. Serezhkin, A.V. Kondratev // Development and Calculation-experimental Analysis of Pressure Pulsations and Dynamic Forces Occurrence Models in the Expansion Joints of Pipelines with Fluid, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 8209-8216 © Research India Publications.

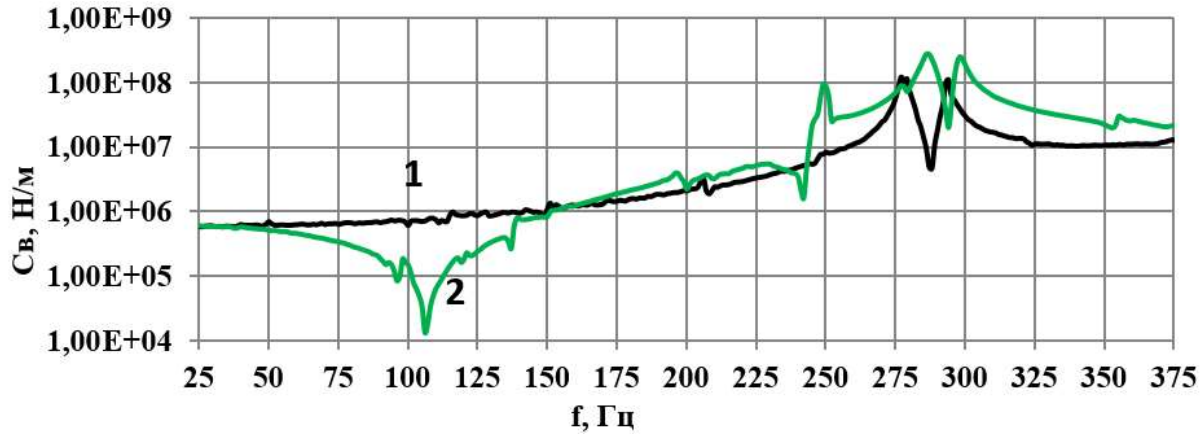


Рис.1 Влияние воды на вибрационную жесткость $S_v(f)$ сдвоенного сильфонного компенсатора диаметром 100 мм. 1- воздух (структурная жесткость), 2 - вода, давление 0,5 МПа.

A.V. Kiryukhin^{1,2}, O.O. Milman^{1,2}, L.N. Sereshkin¹,
M.O. Korljakova³, V.O. Miloserdov²

¹Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky,

²Scientific Production Company "Turbokon",

³Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Kaluga branch

THE PHYSICAL PARTICULARITY OF LIQUID AND STRUCTURE INTERACTION INSIDE THE POWER UNIT PIPELINE VIBRATION-ISOLATING EXPANSION JOINTS

The paper was written on account of the Russian Science Foundation (the RSF) Grant. Agreement No. 16-19-10292 dated May 12, 2016 between the Russian Science Foundation and Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОЦЕССА НАСЫЩЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА ВОЗДУХОМ

Процесс насыщения топлива газом путём барботажа широко используется на практике, в частности в авиационной и ракетно-космических технологиях. Экспериментальному исследованию этого процесса посвящено большое число работ [1, 2]. При этом результаты обработки экспериментальных данных иногда оказываются весьма противоречивыми. В настоящей работе предложена методика расчета процесса насыщения топлива кислородом, учитывающая ряд важных факторов, позволяющая уточнить эмпирическую зависимость [3].

Математическое описание массообмена при барботаже основано на решении дифференциального уравнения [4]:

$$F_{bub}^{\Sigma} \beta (C - C_{surf}) \cdot d\tau = -V_f dC \quad (1)$$

здесь C – концентрация газа в объёме топлива, C_{surf} – концентрация газа на поверхности воздушного пузыря, C_s – равновесная концентрация газа в топливе при заданных условиях, F_{bub}^{Σ} – суммарная поверхность пузырей, β – коэффициент массоотдачи. Интегрируя уравнение (1) при условии, что число и суммарная поверхность пузырей в процессе барботажа остаются постоянными, можно оценить время насыщения:

$$\tau_f = \frac{V_f}{F_{bub}^{\Sigma} \beta} \ln \frac{C_0 - C_s}{C_f - C_s} \quad (2)$$

Здесь C_0 , C_f – концентрация газа в объёме в начале и в конце процесса. Уравнение (2) может быть использовано для приблизительного определения времени насыщения топлива при барботаже слоя через пористые вставки в трубе-барботёре. Существенное влияние на размер пузырей, а, значит, и на их суммарную площадь поверхности оказывают размер пор φ [3]. Можно показать, что объёмное газосодержание потока α также значительно влияет на F_{bub}^{Σ} . Корректирующий множитель, учитывающий эти факторы, определен авторами на основе обработки экспериментальных данных [3], полученных при исследовании времени насыщения топлива ТС-1 кислородом.

Согласно предложенной методике знаменатель в формуле (2) может быть определен следующим образом:

$$(F_{bub}^{\Sigma} \beta)_{cal} = 1.767 V_{air} / d_{bub} \left(\frac{\sqrt{A}}{\varphi} \right)^{0.0736} \alpha^{-0.314} \beta$$

(*) Е.Э. Китанина, kkitanina@mail.ru

Здесь A – площадь пористой поверхности барботера, d_{bub} - средний размер пузырей, определяемый по модели Фрица [4]. Коэффициент массоотдачи определяется на основе аналогии между теплообменом и массообменом при барботаже [4].

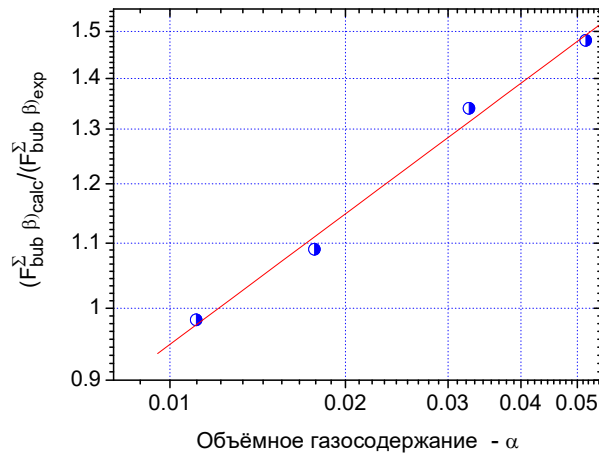


Рис. 1. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными.

Сравнение расчетов с экспериментальными данным показано на рисунке 1. Среднеквадратичное отклонение времени насыщения топлива кислородом, определённого по предложенной в настоящей работе методике, от экспериментальных данных [3] составило 4.27%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.А., Золин А.В., Кобзев С.В., Чугунков В.В. Сравнительный анализ азото-использующих технологий для дегидратации топлива на наземном космодромном комплексе // Бюллетень МГТУ им Баумана, 2013. № 1. с 12.
2. Кобзев С.В. Моделирование массообменных процессов при дегидратации углеводородного ракетного топлива путём барботажа азотом // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Материалы XXXVI Академической конференции по космонавтике. Москва, 2012. с 356
3. Henshaw J., Lam J. // Oxygen Re-Absorption Characteristics of Aviation Turbine Fuel, Bubble Science, Engineering and Technology, 2014. V 5, Issue 1-2.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Новосибирский институт теплофизики, 1979. 659 с.

E.L. Kitanin¹, E.E. Kitanina¹ D.A. Bondarenko²
¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
²Airbus Group Innovations, Moscow

A METHOD FOR CALCULATING THE AVIATION FUEL O₂ SATURATION PROCESS PARAMETERS

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Одноступенчатые процессы газификации топлива разрабатывались и широко исследовались в России и за рубежом на протяжении 20 века. Они остаются основными при создании и проектировании современного газогенераторного оборудования. Во многих исследованиях было показано, что одноступенчатые процессы газификации уже достигли предела совершенствования, за которым существенное улучшение их эксплуатационных характеристик оказывается невозможным и нерентабельным.

Отвечающая современному уровню развития техники технология газификации должна соответствовать следующим критериям: а) работа установки в автоматическом, преимущественно безлюдном режиме; б) функционирование газогенератора должно быть стабильным и обеспечивать незначительные колебания состава и расхода газа; в) станция должна производить минимальное количество жидких и твердых отходов; г) процесс конверсии должен быть, по возможности, малочувствительным к изменению свойств топливной биомассы.

Наиболее полно отвечает современным техническим требованиям технология ступенчатой газификации. В рамках рассматриваемой в статье технологии многоступенчатой газификации были разработаны новые технологические решения, которые позволили создать прототип газогенератора мощностью 30 кВт по топливу (рис. 1). Газогенератор состоит из трех реакторов – реактор пиролиза, реактор дожигания пиролизного газа и смолы, реактор газификации. Такая организация процесса позволяет получать бессмольный генераторный газ. Данный факт был подтвержден в ходе выполнения эксперимента с использованием разработанного газогенератора.

Рисунок 2 показывает эффективность работы реактора дожигания пиролизного газа и смолы. Чем меньше содержание кислорода после данного реактора, тем эффективней процесс дожигания.

Данный газогенератор был рассмотрен в теплоэнергетической схеме мини-ТЭЦ-ДВС, что позволило очертить границы конкурентоспособности и сделать технико-экономические оценки предложенной технологии.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН в рамках научного проекта Ш.17.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0 с использованием оборудования, входящего в ЦКП «Высокотемпературный контур».

^(*) А.Н. Козлов, kozlov@isem.irk.ru



Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда многоступенчатой газификации древесных отходов

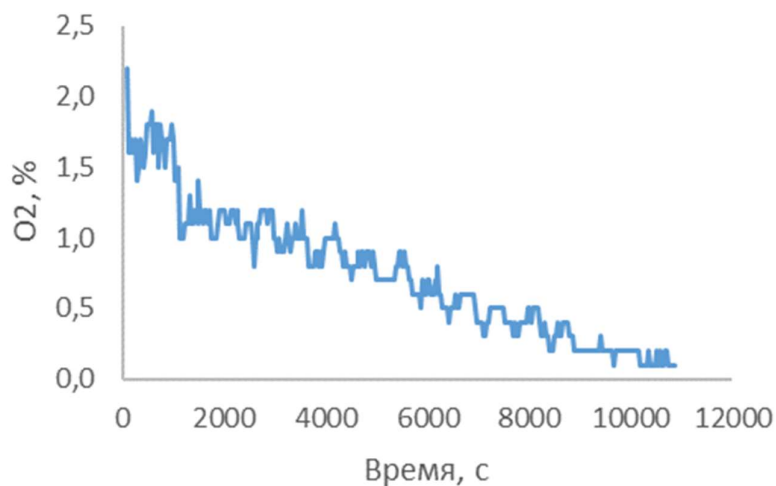


Рис. 2. Зависимость содержания кислорода после реактора дожигания пиролизного газа и смолы в зависимости от времени эксперимента

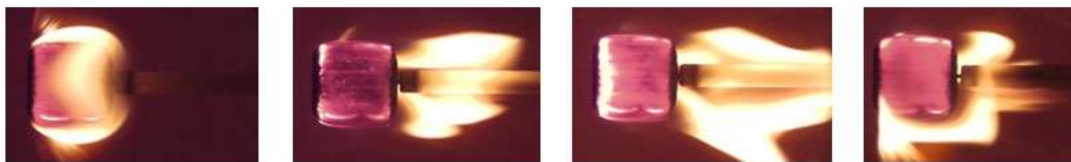
A.N. Kozlov, M.V. Penzik, O.V. Marchenko, S.V. Solomin
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF MULTI-STAGE GASIFICATION OF WOOD WASTES

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЩЕЙ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ДРЕВЕСНОЙ ЧАСТИЦЫ

Энергетическая переработка биомассы с целью получения тепла, электроэнергии и химических веществ является перспективной, поскольку этот вид ресурса является возобновляемым, а его использование не приводит к увеличению выбросов диоксида углерода в атмосферу.

Объектом исследования является совокупность явлений тепло- и массообмена, сопровождающих горение древесных частиц. Процесс горения протекает в две стадии, на первой из которых происходит выход и сгорание вокруг частицы летучих веществ, а на второй стадии наблюдается горение угольного остатка [1,2]. Предметом исследования является промежуточная стадия, протекающая, когда завершается выход летучих веществ, и начинается горение остатка. Данная стадия сопровождается интересным эффектом, который заключается в циклическом перемещении пламени с боковой поверхности частицы к ее тыльной грани, и обратно на боковую поверхность (рис. 1).



Время, с 20,2 20,5 20,8 21,1

Рис. 1. Изображение горящей частицы в одном из циклов перемещения пламени

Для испытания использовались частицы кубической формы с длиной грани 12 мм. Они помещались в предварительно нагретую до 800°C муфельную печь, в которой обдувались воздухом посредством фурмы. Скорость воздуха в устье этой фурмы составляла 20 м/с, и температура воздуха – 20 °С.

Первое перемещение пламени наблюдается после 18-й секунды горения частицы (табл. 1), когда снижается скорость выхода летучих веществ, а их пламя сдувается с боковой поверхности частицы. После этого перемещения пламени уменьшается общая скорость горения частицы, которая определялась по убыли ее массы, согласно методике [3].

(*) М.А. Козлова, mari.kozlova.95@mail.ru

После перемещения пламени становится доступным для окисления кислородом воздуха поверхностный слой древесного угля, покрывающий частицу. Этот слой раскаляется, что приводит к разогреву внутренних слоев частицы и усилению процесса их пиролиза с выходом летучих на поверхность. На боковую поверхность частицы вновь возвращается пламя летучих веществ. Подобное изменение расположения пламени с боковой поверхности на тыльную и обратно может наблюдаться до 6 раз.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00774.

Таблица 1. Временные характеристики циклов перемещения пламени

Длительность события, с	Номер цикла					
	1	2	3	4	5	6
Пламя на боковой и тыльной грани	18.1	1.8	2.1	2.6	0.9	0.2
Пламя на тыльной грани	1.3	1.5	1.7	4.4	2.0	17.6
Весь цикл	-	3.3	3.8	7.0	2.9	-

ЛИТЕРАТУРА

1. Szekely J., Evans J.W., Sohn H.Y. Gas-solid reactions. Elsevier, 2012. 409 p.
2. Combustion of single biomass particles in air and in oxy-fuel conditions / J. Riaza [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2014. V. 64. P. 162-174.
3. Svishchev D.A., Kozlova M.A., Ralnikov P.A. A method of studying thermochemical conversion of single biomass particles in an intense air flow // Journal of physics: conference series. In press, 2019. 6 p.

M.A. Kozlova¹, P.A. Ralnikov², D.A. Svishchev¹
¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
²Ural Federal University

STUDY OF FLAME CYCLIC MOTION ON A SURFACE OF WOOD PARTICLE BURNING IN THE AIR FLOW

**ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ НА ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛООБМЕН,
ИНТЕНСИФИЦИРУЕМЫЙ ВИХРЕВЫМИ ПОДКОВООБРАЗНЫМИ
СТРУКТУРАМИ, ФОРМИРУЮЩИМИСЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ
УСТАНОВЛЕННОГО НА ПЛАСТИНЕ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА**

При натекании на трехмерное препятствие движущегося вдоль стенки потока происходит локальный отрыв пограничного слоя, в результате чего образуется система огибающих тело подковообразных вихрей. В практических приложениях изучение структуры потока в данного рода конфигурациях необходимо, в частности, для корректного предсказания локального теплообмена в области соединения лопаток газовой турбины с торцевой стенкой [1]. Исследованию структуры возникающих подковообразных вихрей и их влиянию на локальный теплообмен посвящено множество работ (см., например, [2-4]).

В настоящей работе представляются результаты численного моделирования для геометрической конфигурации, использованной в экспериментах [3]. Опытные данные [3] получены для течения воды. Соответственно, пренебрегалось влиянием сжимаемости рабочей среды (которое может быть весьма значительным для течения в газотурбинных ступенях). Кроме того, значения числа Прандтля для воды и газов существенно различны. Представляемая работа нацелена на оценку влияния эффектов сжимаемости на локальный теплообмен при дозвуковом течении газа, формирующемся в данной конфигурации.

Общий вид расчетной области и ее размеры показаны на рис.1а (здесь $D/2$ – радиус затупления передней части обтекаемого тела). Рассмотрены два варианта постановки граничных условий на пластине. В первом варианте на части пластины задавался постоянный тепловой поток (как в экспериментах [3]). Во втором случае пластина полагалась изотермической. В обоих случаях поверхность тела считалась адиабатической. В соответствии с условиями экспериментов [3], число Рейнольдса $Re = 24400$. Число Маха набегающего на тело потока газа (воздуха) изменялось в диапазоне от 0,01 до 0,5.

Моделирование проведено на основе системы уравнений Рейнольдса и уравнения энергии, с использованием конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S. Турбулентная вязкость определялась по $k-\omega$ SST модели турбулентности.

^(*) Е.В. Колесник, kolesnik_ev@mail.ru

Результаты расчетов показывают, что во всех случаях перед телом образуется протяженная отрывная область, в которой формируется система подковообразных вихрей (рис. 1b). Структура этих вихрей определяет особенности локальной теплоотдачи на пластине. Для случая тестового расчета (для течения воды) результаты хорошо согласуются с опытными данными [3]. Учет сжимаемости приводит к тому, что при увеличении числа Маха длина отрывной области и размер вихрей увеличиваются, вихри смещаются в сторону от обтекаемого тела. В случае $M=0.5$ появляется дополнительный вихрь.

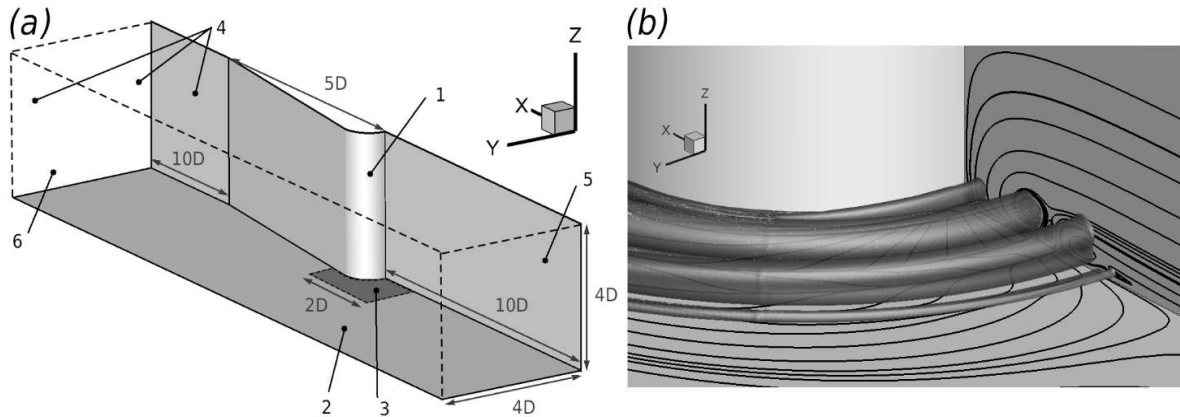


Рис. 1. Расчетная область (а): обтекаемое симметричное тело 1, установлено на пластине 2, обогреваемая часть 3; границы расчетной области: плоскости симметрии 4, входная 5 и выходная 6 границы; (b) – получающаяся в решении система подковообразных вихрей перед телом

ЛИТЕРАТУРА

1. Kang M., Kohli A., Thole K.A. Heat Transfer and Flowfield Measurements in the Leading Edge Region of a Stator Vane Endwall / Journal of Turbomachinery, 1999. Vol.121. P.558-568.
2. Devenport W. J., Simpson R. L. Time-dependent and time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body juncture // J. Fluid Mech., 1990. Vol. 210. P. 23–55.
3. Praisner T.J., Smith C.R. The Dynamics of the Horseshoe Vortex and Associate Endwall Heat Transfer – Part II: Time-Mean Results / ASME J.Turbomach, 2006. Vol.128. P. 755-62.
4. Levchenya A.M., Smirnov E.M., Goryachev V.D. RANS-based numerical simulation and visualization of the horseshoe vortex system in the leading edge endwall region of a symmetric body // International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, Vol. 31, Issue 6. P. 1107-1112.

E.V. Kolesnik, A.A. Smirnovskiy, E.M. Smirnov
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

COMPRESSIBILITY EFFECT ON HEAT TRANSFER INTENSIFIED BY HORSESHOE VORTEX STRUCTURES IN TURBULENT FLOW PAST A BLUNT-BODY AND PLATE JUNCTION

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА СИНТЕТИЧЕСКОЙ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ РАСЧЕТАХ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ
ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИМ МЕТОДОМ**

Теплообмен в турбулентном свободно-конвективном пограничном слое представляет существенный интерес для многих практических приложений. Наиболее полную и детальную структуру течения данного типа, включая особенности теплообмена, позволяет получить численное моделирование на базе вихреразрешающих подходов (LES, DNS). Однако вихреразрешающее моделирование весьма ресурсоемко, особенно если требуется включать в расчетную область участок ламинарно-турбулентного перехода. В случае, когда интерес представляет только турбулентный режим течения, более предпочтительным является подход, предусматривающий задание входных условий, соответствующих развитому турбулентному течению. В случае вихреразрешающих методов на входе необходимо задавать пульсационные составляющие поля течения. Одним из распространенных способов является искусственное задание пульсаций с помощью генератора синтетической турбулентности, которые накладываются на входное течение, полученное из предварительного RANS расчета. На сегодня в литературе не представлены какие-либо результаты, полученные для решения задач свободной конвекции с применением данного способа. В настоящей работе излагается опыт применения генератора синтетической турбулентности для моделирования турбулентного свободноконвективного пограничного слоя вихреразрешающим методом. Расчеты проводились с использованием кода собственной разработки SINF/Flag-S, в котором реализован генератор синтетической турбулентности [1]. Генератор из [1] также был дополнен возможностью создания синтетических пульсаций температуры на основе подхода [2].

Рассматривается свободная конвекция воздуха вблизи вертикальной нагретой пластины для условий эксперимента [3], расчетная область приведена на рис. 1а. Температура пластины составляет $T_w = 60^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $T_a = 16^\circ\text{C}$. Протяженность расчетной области 2.56 м, ширина – 0.48 м (на боковых границах заданы условия периодичности), расстояние от пластины до внешней границы 0.4 м. Решаются нестационарные уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска без использования подсеточной модели турбулентности (Implicit LES). Профили осредненных величин на входной границе берутся из предварительных 2D RANS расчетов в сечении,

^(*) Е.В. Колесник, kolesnik_ev@mail.ru

соответствующем развитому турбулентному течению ($Gr_x \approx 9 \cdot 10^9$); используются следующие модели турбулентности: $k-\omega$ SST, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\varepsilon$ Lien-Leschziner. Исследуется влияния выбора RANS модели турбулентности, используемой для создания входных условий, на протяженность участка трансформации искусственно созданной входной турбулентности в самоподдерживающуюся квази-автомодельную турбулентность.

Установлено, в частности, что выбор вспомогательной RANS модели слабо влияет на протяжённость переходного участка, длина которого составляет около семи толщин пограничного слоя во входном сечении (рис. 2b). Примечательно, также, что изменение теплового потока на переходном участке носит немонотонный характер для всех рассмотренных вариантов RANS модели.

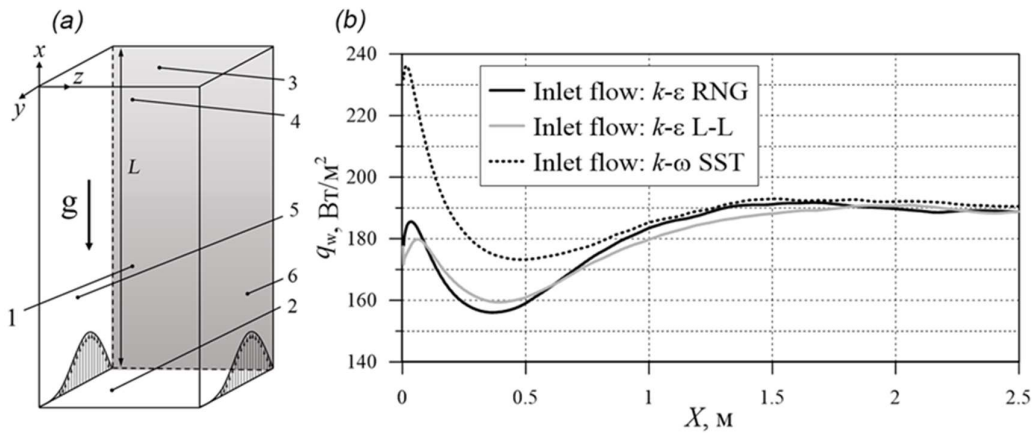


Рис. 1. Расчетная область (a) и изменение осредненного теплового потока вдоль пластины (b)

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Y. Adamian and A. K. Travin. Assessment of an approach to generating inflow synthetic turbulence for large eddy simulations of complex turbulent flows // Progress in Flight Physics. – 2013. – Vol. 5. – P. 43-54.
2. Tsubasa Okaze, Akashi Mochida Large-Eddy Simulation of Non-Isothermal Flow around a Building Using Artificially Generated Inflow Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature // Journal of Heat Island Institute International. – 2017. – Vol. 12, No. 2. P. 29-34.
3. Tsuji, T., Nagano, Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1988. – Vol. 31, No.8. – P. 1723-1734.

E.V. Kolesnik, A.A. Smirnovskiy, N.A Tschur, N.G. Ivanov, E.M. Smirnov
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

EXPERIENCE IN USING A SYNTHETIC TURBULENCE GENERATOR FOR EDDY-RESOLVING SIMULATION OF THE VERTICAL-PLATE FREE CONVECTION BOUNDARY LAYER

ЕДИНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИНДЕКСА ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО КЛАСТЕРА В МАКРОСКОПИЧЕСКИ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ СРЕДАХ

В макроскопически неупорядоченных средах (МНС) с «проводящими» и «непроводящими» компонентами процессы переноса выше порога протекания осуществляются по перколяционному (бесконечному) кластеру (ПК), структура которого на масштабах меньших корреляционной длины фрактальна, на больших – однородна (характеризуется размерностью пространства среды).

Безразмерная эффективная проводимость (далее проводимость) фрактального ПК описывается степенной зависимостью $\Lambda_0 \propto (\mathcal{G} - \mathcal{G}_c)^t$, где \mathcal{G} – объёмная концентрация проводящего компонента, \mathcal{G}_c – порог перколяции, t – индекс проводимости, значение которого по разным данным для трехмерных сред можно оценить в пределах от 2.0 до 1.417 [1].

Проводимость однородного ПК также можно описать степенной зависимостью $\Lambda_0 \propto \mathcal{G}^n$ основанной на принципах статистики пористого тела (значения n находятся в диапазоне от 2 до 1.5) [2].

Учитывая аналогию в описании проводимости и статистическую природу формирования фрактальной и однородной частей ПК разработан единый подход к определению индекса проводимости во всей области существования ПК.

Рассматривалась двухкомпонентная трехмерная МНС состоящая из элементов (частицы, узлы, связи) проводящей и непроводящей фаз, которые обладают равноправной вероятностью распределения в рассматриваемой среде. В такой МНС наблюдается классическая перколяция, согласно которой в процессах переноса участвует только активная часть (подструктура) фрактального ПК – остов перколяционного кластера (backbone) с входящими в его состав другими подструктурами: скелет (skeleton), красные связи (red bonds). У всех подструктур фрактальные размерности, меньше размерности ПК. Поэтому на масштабах больших, но близких к корреляционной длине ПК, структура ПК в целом перестает быть фрактальной (при $\mathcal{G} = \mathcal{G}_h$ [1]), а его подструктуры остаются фрактальными до масштабов корреляционных длин, соответствующих определенной подструктуре. Такая квазифрактальная структура ПК является переходной зоной, в которой происходит кроссовер – изменение фрактальных размерностей подструктур до топологической размерности. Учитывая, то что наименьшей фрактальной размерностью

^(*) Б.П. Колесников, gradient06@mail.ru

обладают красные связи, то масштаб корреляционной длины красных связей определяет окончание кроссовера (при $\mathcal{G} = \mathcal{G}_d$).

В результате анализа влияния подструктур на процессы переноса, определены диапазоны существования фрактальной ($\mathcal{G}_c < \mathcal{G} \leq \mathcal{G}_h$) и квазифрактальной ($\mathcal{G}_h < \mathcal{G} \leq \mathcal{G}_d$) частей ПК, что позволило более точно определить зависимость $t = f(\mathcal{G})$ для указанных диапазонов и, учитывая равновероятность распределения компонентов и их структурную взаимозависимость, для однородной ($\mathcal{G}_d < \mathcal{G} \leq 1$) части ПК - $n = f(\mathcal{G})$ (рис. 1). При условии $\mathcal{G} = \mathcal{G}_d$ соблюдается равенство $(\mathcal{G}_d - \mathcal{G}_c)^t = \mathcal{G}_d^n$. Показатели t и n соответствуют «потолку» проводимости при заданных значениях концентрации.

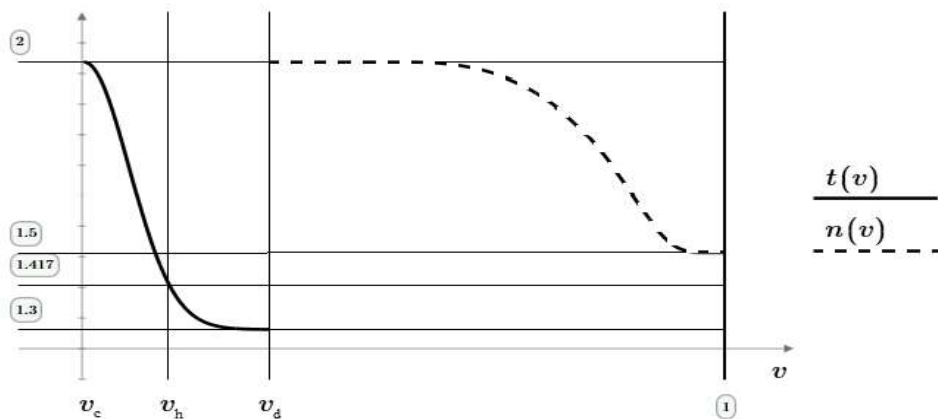


Рис. 1. Значения индексов эффективной проводимости t - фрактальной и квазифрактальной, n - однородной частей перколяционного кластера

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolesnikov B. P. Influence of fractal substructures of the percolating cluster on transferring processes in macroscopically disordered environments // J. of Physics: Conference Series Volume 891 (2017) 012355.
2. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972.

B.P. Kolesnikov
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

THE UNIFIED APPROACH TO A DEFINITION OF EFFECTIVE CONDUCTIVITY INDEX OF PERCOLATING CLUSTER IN MACROSCOPICALLY DISORDERED ENVIRONMENTS

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОМПАКТНОМ ПОРИСТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ИЗ ВСПЕНЕННОГО АЛЮМИНИЯ

Пористые материалы получили широкое применение при создании компактных устройств тепловой защиты в различных предметных областях. При этом стоит задача разработки универсальных методик расчета компактных пористых теплообменников. Наиболее предпочтительным является использование точных аналитических решений [1-2], но при этом необходима верификация с экспериментальными данными. В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при однофазном течении теплоносителя через пористый теплообменник изготовленный из вспененного алюминия при удельном тепловыделении до 100 Вт/см^2 и сопоставление с ранее полученными аналитическими решениями, что позволяет использовать последние для разработки компактных теплообменников нового класса.

Исследования проводились на специально разработанной экспериментальной установке (рис. 1а). Опытный теплообменный элемент изготавливался из алюминия методом литья под давлением в вакуум (вакуумная машина GE 4KG) и представляет собой сплошную пористую среду в виде правильного параллелепипеда. В качестве порообразующего наполнителя использовалась поваренная соль.

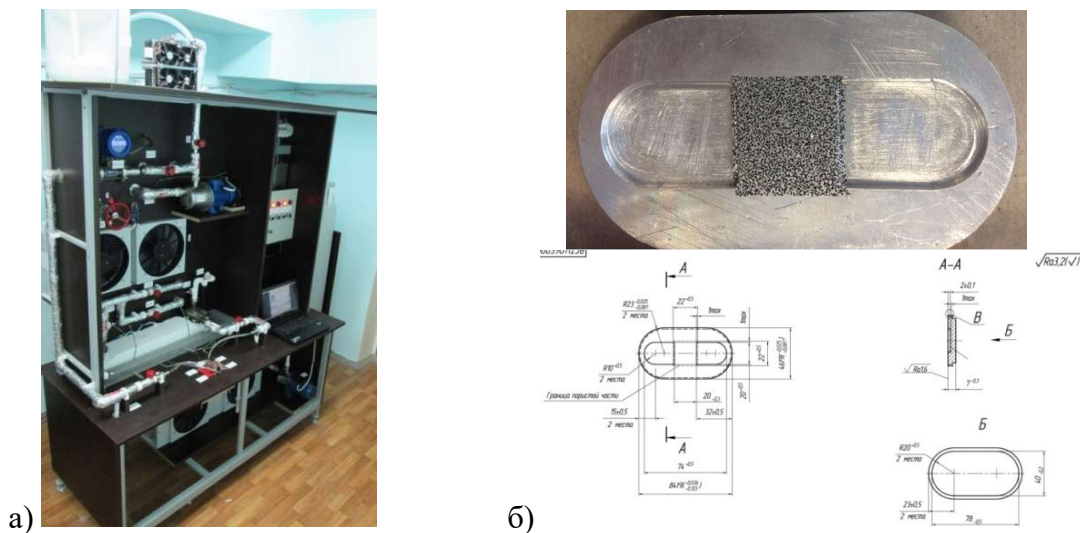


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – общий вид; б – опытный образец

^(*) Д.А. Коновалов, dmikonovalov@yandex.ru

В результате проведенных исследований получены новые экспериментальные данные по теплообмену в компактном пористом теплообменнике в широком диапазоне расходов и тепловых нагрузок (рис. 2).

Установлено, что ранее полученные точные аналитические решения имеют сходимость (менее 0,6 %) с результатами экспериментальных исследований, что позволило подтвердить основные закономерности теплообмена, выявленные в результате разработки математических моделей и позволяет рассматривать их как инструментальный при выборе рациональных параметров пористых теплообменников.

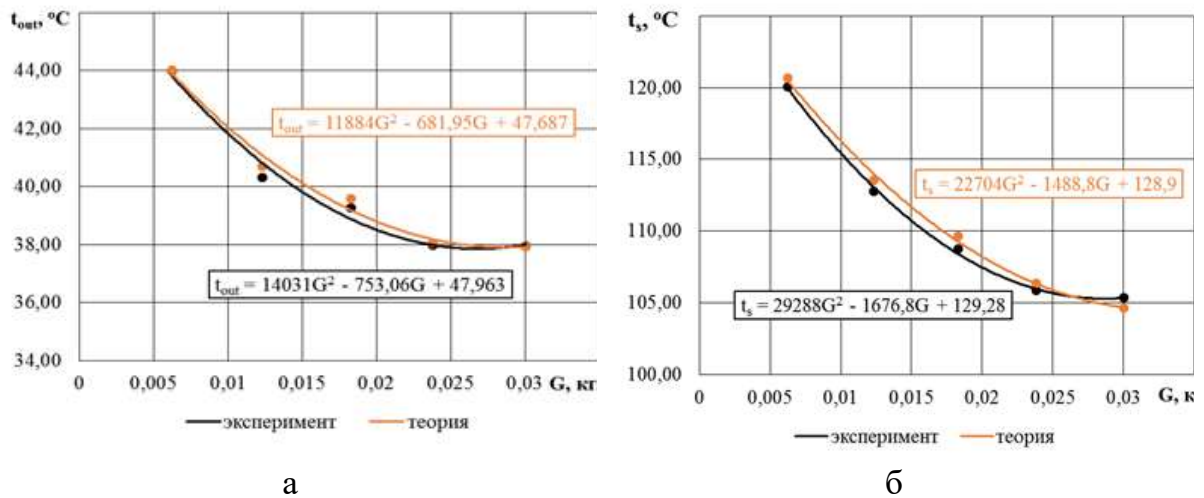


Рис. 2. Результаты эксперимента: а – зависимость температуры на выходе из теплообменника от расхода теплоносителя; б – зависимость температуры основания теплообменника от расхода теплоносителя

ЛИТЕРАТУРА

1. Konovalov D.A., Ryazhskikh V.I., Ryazhskikh A.V., Boger A.A., Dakhin S.V. Analytical solution to the problem of convective heat transfer in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second genus // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS), 2017, vol. 10, no. 3, pp. 40-53.
2. Konovalov D.A., Ryazhskikh V.I., Drozdov I.G. Analytical solution of hydrodynamics and heat exchange problem in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second kind // PTPPE-2017. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012103.

D.A. Konovalov, V.I. Ryazhkih, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, N.N. Kozhuhov
Voronezh State Technical University

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN COMPACT POROUS HEAT EXCHANGER MADE OF FOAMED ALUMINUM

EXPERIMENTAL STUDY OF PARTIALLY PREMIXED–DIFFUSION TURBULENT FLAME WITH CIRCULAR PLATE BLUFF-BODY

Partially premixed flames are those with regions of varying mixture composition ranging from fuel rich to stoichiometric and fuel lean. Partially premixed flames have a wide range of applications since they are often more stable than both the premixed and diffusion flames [1], [2]. Stabilization of partial premixed-diffusion flame attracts more researches. Bluff bodies are one used method for flame stabilization. These bodies intentionally induce separation of the flow on the lee ward side of the body [3].

Lee et al [1] investigated the characteristics of partially premixed turbulent flames. They found that the ratio of the inner to outer jet velocities has the most dominant effect on the flame characteristics. In addition, they found that the flame height decreased with a relatively small increase in the inner jet flow rate. They mentioned that controlling both flame length and stability can be achieved by varying the velocity ratios and the inner tube recess to inner diameter ratio, respectively.

Chen et al [4] simulated lifted turbulent methane/air and propane/air jet flames by changing fuel exit velocities and nozzle diameters. They combined the flamelet models for turbulent premixed and diffusion combustion. They explained the stabilization mechanisms be by the partially premixed flame propagation approach.

The above literature review reveals that previous work deals with either partial premixed-diffusion flame or bluff body stabilization. Methane or H₂ were added as a combustion enhancement fuels. It is the aim of this study to use LPG fuel as it is a nonhazardous and commercially available fuel with bluff body stabilizers in a partially premixed-diffusion turbulent flame. The study covers two parts. The first part investigates the effect of varying the of the equivalence ratio, partial premixed ratio, and blockage ratio on the temperature and flame characteristic. The second part focuses on the effect of partial premixed ratio on the blow off limits.

RESULTS AND DISCUSSION

Residence time. It is defined as the time available for the combustible mixture and products to reside in the recirculation zone. It is the fact that as the residence time is increased, the combustion process is well promoted and its efficiency is increased. Residence time, τ , can be calculated from Eq. (1) [5].

$$\tau = c L_r / V_j \quad (1)$$

Where L_r is the recirculation zone length and V_j is the jet velocity, and c is the proportionality constant. Figure 1 shows the variations of the residence time with the

(*) M. Koraiem Handawy, mohkoraiem@mu.edu.eg

premixed ratio α for different premixed values Φ . It is obvious that as α increased the residence time gets longer with higher rate at lean mixture but it slows down as Φ is increased. This is due to the increase in the premixed jet velocity at the outer periphery as α increased. As the fuel mixture shifts from lean to rich, the speed of reaction is increased and the residence time rate of growth is decreased. In general, the increase in τ causes an increase in the recirculation zone length.

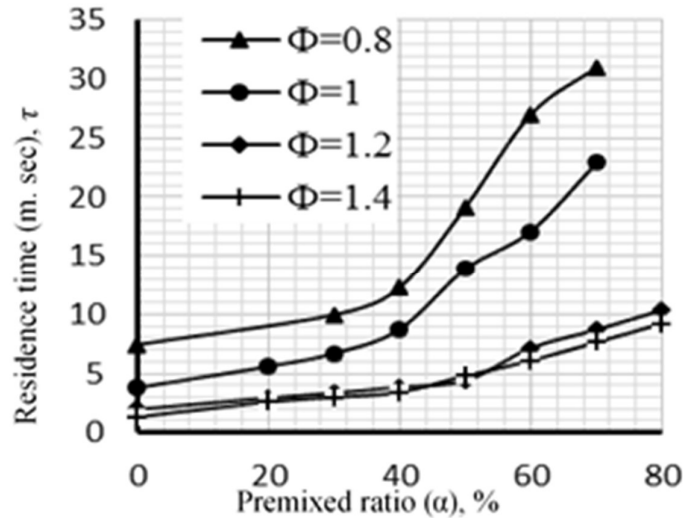


Fig. 1. The effect of premixed ratio on residence time at varied Φ

REFERENCES

1. T. Lee, M. Fenton, R. S.-C. and flame, and undefined 1997, "Effects of variable partial premixing on turbulent jet flame structure," Elsevier.
2. A. E.-E. T. and F. Science and undefined 2013, "Early structure of LPG partially premixed conically stabilized flames," Elsevier.
3. A. Cuoci, A. Frassoldati, T. F.-... energy, T. Italian, and undefined 2010, "CFD simulation of a turbulent oxy-fuel flame," combustion-institute.it.
4. M. Chen, M. Herrmann, N. P.-P. of the C. Institute, and undefined 2000, "Flamelet modeling of lifted turbulent methane/air and propane/air jet diffusion flames," Elsevier.
5. I. M. M. E. R. I. El-Ghnam, K. H. El-Nager, E. A. Abdel-Hadi, "An Experimental Investigation for The Influence of Flame Holder Geometry on Flame Stability of Premixed Mixture," ERJ-Faculty Eng. Shoubra, vol. 18, pp. 62–77.

М. Корайем Хандави^{1,2}, А.А. Хагазй², О.М. Дахаб², Н.С. Коура²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²Аль-Минья Университет, Аль-Минья, Египет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЧНО- ПЕРЕМЕШАННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ С ПРЕПЯТСТВИЕМ КРУГЛОЙ ФОРМЫ

KINETIC MODELING PYROLYSIS AND COMBUSTION OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE BLENDS

Over the past decades, considerable experience has been gained in experimental research and mathematical modeling of the pyrolysis and combustion of a wide range of synthetic and natural polymeric materials. The need to predict the power of heat generation during the processing and incineration of shredded household waste, as well as gasification and combustion of the fire load raises the question of the correctness of the use of measurement results obtained for individual substances.

The additivity of heat generation during the combustion of volatile components formed during the independent pyrolysis of individual components of the fuel mixture is a natural assumption used in engineering calculations. This assumption is valid in the absence of chemical interaction between different polymers, which, however, is possible both in the condensed phase of a decomposing solid material and in the gas phase during the oxidation of volatile materials. In fact, it is known that there can be both a decrease and an increase in the thermochemical stability of the mixture compared to the expected one in accordance with the additivity rule [1]–[3].

In this study, the pyrolysis and combustion of a binary mixture of most waste polymers were investigated using MCC measurements and noticeable an interaction which may either facilitate or delay the thermal decomposition of the materials [1]. By the help of MCC data, the non-isothermal kinetic analysis was performed using different kinetic methods to describe the mixture pyrolysis by a single global reaction with activation energy, E_a , depending on conversion:

$$\frac{dT}{dt} = \beta \quad T(0) = T_0$$

$$\dot{q} = \overline{\Delta q'} Af(\alpha) \exp\left(-\frac{E_a(\alpha)}{RT}\right)$$

RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1-a shows MCC measurements for individual polymers obtained at $\beta = 0.25, 0.5, 1, 1.5$ °C/s. As shown HDPE is faster in reaction, this was observed the maximum heating release rate occurs in temperature range 493-530 °C/s early then PC which at 520-570 °C/s, as evidenced by the temperature of $T=10\%, 90\%$ weight loss. As noticed there is one peak heat release rate (one step ration) The MCC measurements blend HDPE/PC for mass fraction ratio $Y_i=0.5$ was carried out at four different heating rates (0.25, 0.5 1, and 1.5 °C/s) are shown in Fig. 1-b. Therefore, HDPE, as expected, decomposes at much lower temperature than PC. Accordingly, the maximum

* M. Koraiem Handawy, mohkoraiem@mu.edu.eg

decomposition temperatures (T_p) observed for PC and PS at 1.5 °C/s are 477 and 565 °C respectively. The observed trend in the variation of T_p . The heat release rate for the same blends has the same situation for maximum temperature. Comparing blend curves with its individuals the reaction progress in multi-step reaction as we refer it the pyrolysis peaks emerging in distinct temperature ranges [4].

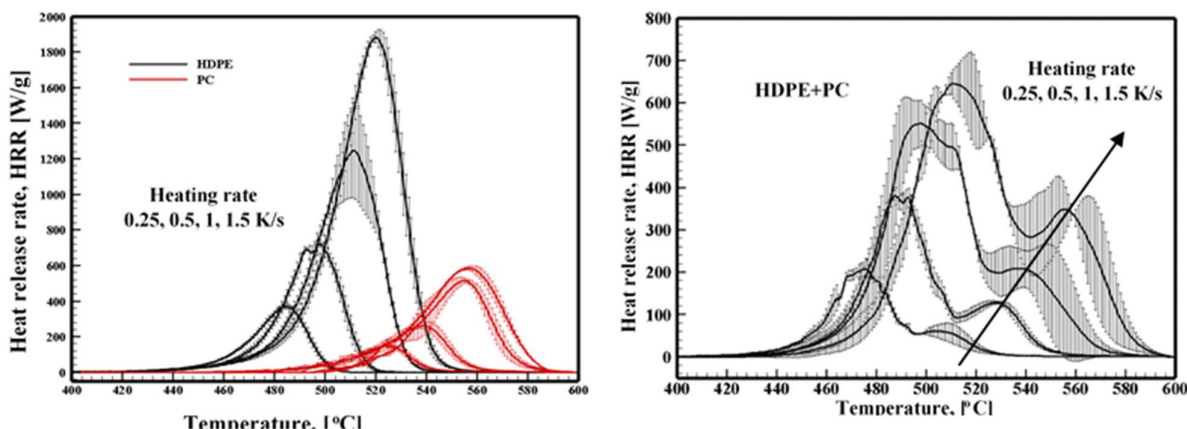


Fig. 1. a) TGA curve of sawdust at a heating rate of 10 oC/min,
b) Effect of temperature product yield.

REFERENCES

1. A. Y. Snegirev, M. K. Handawy, V. V. Stepanov, and V. A. Talalov, “Pyrolysis and combustion of polymer mixtures: Exploring additivity of the heat release rate,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 161, 2019.
2. V. V. S. Mohamed Koraiem Handawy, Alexander Snegirev, Victor A. Talalov, “Pyrolysis and Combustion of Polymer Mixtures. Is the Heat Release Rate an Additive Quantity?,” *Conf. Proc. Ninth Int. Semin. Fire Explos. Hazards (ISFEH9) At Saint-Petersburg, Russ.*, vol. 2, pp. 1122–1113, 2019.
3. A. Y. Snegirev, V. A. Talalov, V. V. Stepanov, O. P. Korobeinichev, I. E. Gerasimov, and A. G. Shmakov, “Autocatalysis in thermal decomposition of polymers,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 137, pp. 151–161, 2017.
4. G. Özsın and A. E. Pütün, “TGA/MS/FT-IR study for kinetic evaluation and evolved gas analysis of a biomass/PVC co-pyrolysis process,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, no. September 2018, pp. 143–153, 2019.

М. Корайем Хандави^{1,2}, А.Ю. Снегирев¹, В.В. Степанов¹, В.А. Талалов¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²Аль-Минья Университет, Аль-Минья, Египет

КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗА И СЖИГАНИЯ СМЕСЕЙ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Т.И. Короткова^(*), С.А. Колесник, Б.А. Гарибян,
С.Ю. Лунёва, Я.В. Кузьмина
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)» (МАИ)

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЯ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ В БОЛЬШОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Рассматривается большая теплоснабжающая система, которая всегда имеет многоуровневую иерархическую структуру. Имеются уровни магистральных и распределительных тепловых сетей с промежуточными ступенями регулирования. Планирование и выбор режима, обеспечивающего требуемые тепловые нагрузки, сопряжены в такой системе с большим количеством различных факторов, усложняющих процесс принятия решения.

Задача многоуровневого наладочного теплогидравлического расчёта рассматривалась в работе [1]. В работе [2] эта задача была рассмотрена в аспекте взаимосвязей между управляющими переменными и состояниями иерархической системы, управляемой по нескольким критериям. Задача рассматривалась в рамках модели принятия решения в трехуровневой иерархической системе. В работе [3] было проведено исследование тепловых процессов в неоднородных материалах и предложена математическая модель теплопереноса в областях с многомерными разрывами теплофизических и геометрических характеристик.

В глобальном аспекте должна быть обеспечена и безопасность, и надежность, и эффективность работы сложной системы в целом в процессе эксплуатации. Поэтому оценка критериев оптимальности такой системы проводится сразу по нескольким показателям, например по давлению, расходу, температуре. При проведении измерений измеряемые параметры флуктуируют, и параметры распределения величин этих флуктуаций, точно не известны. Измерительные приборы, регистрирующие те или иные параметры, характеризуются своими случайными погрешностями, распределения которых тоже точно не известны. Поэтому всегда подобная сложная задача системного анализа предполагает наличие различного рода неопределенных и случайных факторов. При этом часто нарушается согласованность решений локальных задач, что ставит под угрозу обеспечение оптимальности решения глобальной многокритериальной задачи в сложной системе.

Выбор оптимального эксплуатационного режима работы сложной системы теплоснабжения производится на основе итерационного процесса координации,

^(*) Т.И. Короткова, tatyanamail11@yandex.ru

который должен сходиться к согласованному решению локальных оптимизационных задач. Однако, именно вследствие наличия неконтролируемых неопределенных и случайных факторов в самом итерационном процессе, сходимость его нарушается, и могут появиться сбои. По случайным факторам проводится осреднение. Принятие решения основано на принципе гарантированного результата. Отсутствие корреляции между случайными и неопределенными факторами позволяет улучшить этот результат путём изменения последовательности операций осреднения по случайностям и операций оптимизации по неопределенностям.

При сбоях отклонения в системе могут компенсироваться только в интерактивном режиме реального времени. Лицо, принимающее решение, запускает новый пересчёт по заданному алгоритму параметров и режимов эксплуатации системы. Это позволяет проводить наладочные мероприятия оптимальным образом и повышать качество теплоснабжения потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Методика многоуровневого наладочного расчёта теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // Теплоэнергетика, 2016. №1. С. 71.
2. Korotkova T.I., Popova V.I. Multicriteria hierarchical iterative interactive algorithm for organizing operational modes of large heat supply systems // J. Phys. Conf. Ser., 2017. V.891. Article ID 012164.
3. Василевский Д.В., Гарибян Б.А., Спирин Г.Г. Исследование неравновесности при быстром плавлении вещества // Теплофизика высоких температур, 2009. Т.47. №4. С. 637.

T.I. Korotkova, S.A. Kolesnik, B.A. Garibyan,
S.Yu. Luneva, Ya.V. Kuzmina
FSBEI HE "Moscow Aviation Institute
(National Research University)" (MAI)

MULTICRITERIA MODEL OF MANAGING DECISION-MAKING WITH UNCERTAINTIES IN A LARGE HEATING SYSTEM

**ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ ДИФФУЗИОННОГО МАССОПЕРЕНОСА В
ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТРОЙНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ**

Исследуя особенности перехода от диффузионного состояния к конвективному было установлено, что смена режимов проявляется в системах, где имеет место существенное различие в коэффициентах переноса [1]. Для изотермических тройных газовых смесей с малым содержанием компонента с наибольшим молекулярным весом было получено решение системы уравнений диффузии, которое показало возможность нелинейных изоконцентрационных распределений в вертикальных каналах [1]. В данной работе, распространяя подход [1] на случай произвольного состава смеси, численным образом получено решение квазистационарной системы уравнений трехкомпонентной диффузии для системы двух колб, соединенных вертикальным капилляром (рис. 1а).

Одномерная изотермическая трехкомпонентная диффузия описывается системой уравнений [1]:

$$\sum_{i=1}^3 c_i = 1; \quad n \sum_{i=1}^3 c_i u_i = 0, \quad \operatorname{div}(n c_i u_i) = 0, \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$\sum_{j \neq i} \frac{c_i \cdot c_j}{D_{ij}} (u_i - u_j) = -\operatorname{grad}(c_i), \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3,$$

где n – числовая плотность, u_i – средняя скорость молекул i -го компонента; D_{ij} – коэффициенты взаимной диффузии, c_i – концентрация i -го компонента.

Решение диффузионных уравнений (1) с учетом граничных условий имеет вид:

$$c_1(z) = -B \cdot \left[j_1 \cdot \left(X_3 \cdot z - X_1 + \frac{A}{B} \right) - X_2 \cdot K_1 \cdot \exp\left(\frac{z}{B}\right) \right],$$

$$c_3(z) = -B \cdot \left[j_3 \cdot \left(X_3 \cdot z - X_1 - \frac{A}{B} \right) + X_2 \cdot K_3 \cdot \exp\left(\frac{z}{B}\right) \right], \quad (2)$$

$$c_2(z) = 1 - c_1(z) - c_3(z),$$

где K_i , X_i , A , B , j_i – вычисляемые константы. Соотношения (2) позволяют найти распределение плотности смеси ρ , а также ее градиент.

(*) В.Н. Косов, kosov_vlad_nik@list.ru

Как показали приведенные в [2] опыты, в системе $\text{H}_2 + \text{N}_2 - \text{CH}_4$ возникают конвективные течения, связанные с неустойчивостью механического равновесия смеси. Распределения концентраций, приведенные на рис. 1б, показывают нелинейное распределение концентрации компонента с наибольшим молекулярным весом. Распределение плотности смеси имеет явно немонотонный характер (рис. 1в). Причем существуют локальные области по координате, при которых градиент плотности меняет знак. По-видимому, этим фактом объясняется возможность проявления в таких системах конвективной неустойчивости и гравитационной конвекции.

Часть представленных результатов получена в рамках проекта № AP05130986 Комитета науки Министерства образования и науки РК.

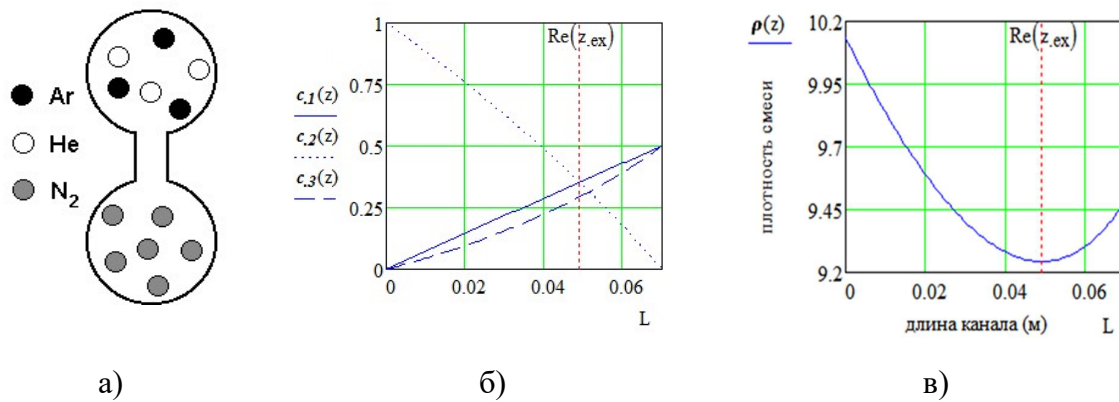


Рис. 1. Диффузионная ячейка и распределения концентраций компонентов и плотности смеси $0,5 \text{ H}_2 + 0,5 \text{ N}_2 - \text{CH}_4$ при $p = 1,5 \text{ МПа}$, $T = 298,0 \text{ К}$, $L = 70,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $r = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. а) схема экспериментального устройства, б) концентрационные профили, в) распределение плотности смеси

ЛИТЕРАТУРА

1. Косов В.Н., Селезнев В.Д. Аномальное возникновение свободной гравитационной конвекции в изотермических тройных газовых смесях. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 149 с.
2. Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Жаврин Ю.И., Федоренко О.В. Влияние концентрации компонентов смеси на возникновении конвективных режимов смешения при диффузии в тройных газовых смесях // Журнал физической химии, 2017. Т. 91. № 6. С. 931.

V.N. Kossov¹, O.V. Fedorenko², V. Mukamedenkyzy², A. Kalimov¹

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan,

²Institute of Experimental and Theoretical Physics
at Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan

SPECIAL MODES OF DIFFUSION MASS TRANSFER IN ISOTHERMAL TERNARY GAS MIXTURES

ДИФфуЗИОННЫЕ И КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ СМЕШЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ ГАЗОВ, РАСТВОРЕННОЙ В ТРЕТЬЕМ КОМПОНЕНТЕ

Если два основных газа разбавлять в равной степени различными балластными газами, что соответствует одному из аномальных режимов процесса переноса – осмотической диффузии [1], то характер массообменных процессов будет зависеть от того, какой газ-разбавитель (легкий или тяжелый) находится в смеси.

Целью настоящей работы является изучение природы балластного газа на диффузионные и конвективные режимы смешения бинарной смеси газов в условиях эквимоллярности потоков методом вычислительного эксперимента.

Нами была исследована диффузия в смеси пары газов H_2 и Ar , которая разбавлялась сначала легким, а затем более тяжелым компонентами. Для рассматриваемой системы вычислительный эксперимент проводился на основе линейного анализа на устойчивость для плоского вертикального канала с массонепроницаемыми стенками [2]. Расчеты проводились при температуре $T = 298$ К и давлении $p = 0.101$ МПа.

Результаты численного эксперимента для систем $0,5009 H_2 + 0,4991 He - 0,4969 Ar + 0,5031 He$ и $0,4958 H_2 + 0,5042 N_2 - 0,5106 Ar + 0,4894 N_2$ приведены на рис. 1. На рис. 1 также показано расположение линии монотонной неустойчивости I и нулевого градиента плотности II. Рассматриваемые системы являются устойчивыми. В системе $0,5009 H_2 + 0,4991 He - 0,4969 Ar + 0,5031 He$ парциальные числа Рэлея, соответствующие теплофизическим условиям задачи, имеют следующие значения: $Ra_1 = - 6,6364$ и $Ra_2 = - 229,1691$ (точка 1). Для системы $0,4958 H_2 + 0,5042 N_2 - 0,5106 Ar + 0,4894 N_2$ парциальные числа Рэлея имеют следующие значения: $Ra_1 = - 35,214$ и $Ra_2 = - 44,9886$ (точка 2). Таким образом, замена легкого балластного газа (гелия) на тяжелый (азот) приводит к уменьшению парциального числа Рэлея Ra_1 для легкого компонента и увеличению парциального числа Рэлея Ra_2 для тяжелого компонента.

Если поменять расположение газов относительно диффузионного канала, т. е. рассмотреть неустойчивые системы, то замена легкого балластного газа на тяжелый приводит к тому, что парциальное число Рэлея Ra_1 для легкого

(*) В.Н. Косов, kosov_vlad_nik@list.ru

компонента увеличивается, а парциальное число Релея Ra_2 для тяжелого компонента уменьшается ($Ra_1 = 2,4003$ и $Ra_2 = 52,2355$ (точка 3, система $0,4969 \text{ Ar} + 0,5031 \text{ He} - 0,5009 \text{ H}_2 + 0,4991 \text{ He}$); $Ra_1 = 2,4003$ и $Ra_2 = 52,2355$ (точка 4, система $0,5106 \text{ Ar} + 0,4894 \text{ N}_2 - 0,4958 \text{ H}_2 + 0,5042 \text{ N}_2$)).

Таким образом, проведенные исследования показали, что природа балластного газа оказывает существенное влияние на диффузионное и конвективные режимы смешения основных диффундирующих компонентов.

Часть представленных результатов получена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта № AP05130712.

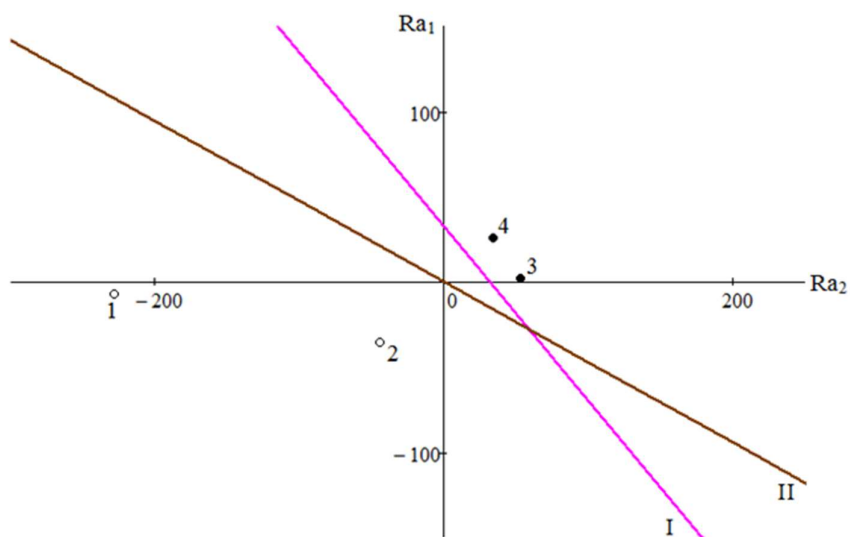


Рис. 1. Области устойчивой и неустойчивой диффузии для систем $\text{H}_2 + \text{He} - \text{Ar} + \text{He}$, $\text{H}_2 + \text{N}_2 - \text{Ar} + \text{N}_2$, $\text{Ar} + \text{He} - \text{H}_2 + \text{He}$ и $\text{Ar} + \text{N}_2 - \text{H}_2 + \text{N}_2$

ЛИТЕРАТУРА

1. Дильман В.В., Каширская О.А., Лотхов В.А. Особенности многокомпонентной диффузии // Теор. Основы Хим. Технологии, 2010. Т. 44. № 4. С. 396.
2. Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Федоренко О.В., Акжолова А.А. Некоторые особенности многокомпонентного массопереноса при конвективной неустойчивости газовой смеси // Теор. Основы Хим. Технологии, 2016. Т. 50. № 2. С. 177.

V.N. Kossov¹, O.V. Fedorenko², V. Mukamedenkyzy², M. Tuken²

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan,

²Institute of Experimental and Theoretical Physics
at Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan

DIFFUSION AND CONVECTIVE MIXING MODES OF BINARY GAS MIXTURES DISSOLVED IN THE THIRD COMPONENT

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ ВИХРЕВЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ И ТОПОК

Успех создания и внедрения вихревых устройств сжигания, газификации и термической переработки твердых топлив, отходов или биомассы осложнен рядом теоретических и инженерных проблем. Опыт показал - реальные потоки с горением твердой взвеси могут существенно отличаться от умозрительных представлений о характере течений закрученных потоков (вихрей) с осевым движением (стоком) в камерных завихрителях или цилиндрах. Это проявляется в наличии спиралевидных течений физической и химической неоднородности в вихрях с осевым стоком по их длине и по радиусу, а также в неконтролируемом выносе твердого материала из камер закрутки и горения. Сюда же отнесем провал твердой взвеси вниз камер с вертикальной осью вращения вихря или отложения взвеси или шлака на боковых стенках камер с горизонтальной осью вращения потока. Разумеется, на практике это вызывает неполноту сгорания или недостаточное качество переработки твердого сырья, требует повышения эксплуатационных расходов на ремонты, остановки и пуски.

Очевидная проблема – сильная неоднородность по радиусу газового вихря интенсивности крутки его кольцевых слоев, а также их фрагментов в вихревых аппаратах, что усиливает анизотропность турбулентности. При интерпретации экспериментов и расчетов большое значение имеет характер представления или интерпретации момента вращения, которые зависят от того, о каком вихре идет речь – условно «плоском» или «объемном». В первом случае момент вращения выражают через квадрат вращательной скорости, в ином – через произведение вращательной и осевой скоростей. В зависимости от принятых представлений момента вращения в пространстве или в аппарате принципиально отличаются картины распределения момента в закрученном потоке и его крутка. Величина момента вращения в обоих случаях изменяется в объеме улитки при повороте потока в 2-2,5 раза. При этом становятся очевидными места локализации взвеси на стенке камеры (улитки, циклона) и зоны выноса отсепарированной взвеси.

Полученные нами данные по выносу и отложениям взвеси практически полностью совпали с данными экспериментов, полученными нами на моделях горелок и циклонов. Но более важным в понимании процессов при анализе интенсивно закрученного распределение в вихре плотностей потока количества

(*) В.В. Костюнин, kostuninv@mail.ru

движения и потока момента вращения, например, параллельно оси вращения. Для практики важно сопоставлять распределение в вихре потоков плотностей момента вращения в обеих моделях вращения, сопоставляя с распределениями количества движения. Наш опыт показал важность анализа локализации в вихре максимумов плотностей потоков количества движения и момента при любой форме представления. При закрутке потока в камерном завихрителе (в улитке или циклоне) локализации максимумов обеих характеристик имеют вид спиралей, обычно не совпадающих друг с другом. Это и указывает на причину появления в вихре спиралевидных структур, являясь и причиной отложений взвеси в определенных участках на боковой стенке камеры, и выноса взвеси на определенном сегменте выходного окна камеры. При переходе в цилиндр или в пространство необходимо выравнивать эти структуры вихря, концентрации в нем взвеси, в том числе горящей. Для этого кольцевые зоны плотностей осевых потоков момента вращения и потоков количества движения должны быть симметричными относительно оси. Это достижимо приемами, отработанными нами на разных объектах, на базе которых нами созданы две серии вихревых газификаторов с управляемыми горящими вихрями. Первая – это трехкамерные газификаторы, которые успешно эксплуатировались на опиле и шелухе, а также испытаны на торфе и их смесях биомассы с углем.

Наиболее интересны четырехкамерные газификаторы (рис.1), которые могут работать на горючих сланцах и даже на костной муке. При газификации отходов сланцевого производства нами было получено частичное улавливание оксидов серы и снижение концентраций углекислого газа в горючем газе на выходе. Механическая неполнота сгорания в зависимости от вводимого сырья была снижена с 3 – 5 % до 0,01 – 0,5 %.

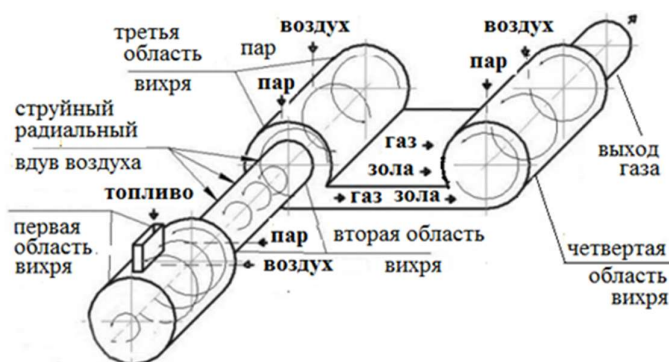


Рис.1. Схема четырехкамерного вихревого газификатора

V.V. Kostyunin¹, V.N. Potapov², D.A. Kapralov³

¹Co Ltd «Vichrevye sistemy»,

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin

³Co Ltd «KSK»

AERODYNAMIC PROBLEMS WHEN DEVELOPING THE NEW VORTEX GENERATORS AND FURNACES

СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ, ВОЗМУЩАЕМЫЙ ПОПЕРЕЧНЫМ РЯДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЕПЯТСТВИЙ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ RANS-ПОДХОДА

Течения в пристенных пограничных слоях, возмущаемые наличием в них трехмерных препятствий, характерны для большого числа технических устройств. Такого рода течения хорошо исследованы в случае вынужденной конвекции [1]. Свободно-конвективные пограничные слои, возмущаемые препятствиями, изучены слабо. В настоящей работе исследуются особенности течения, формирующегося при натекании турбулентного свободно-конвективного слоя на поперечный ряд круговых цилиндров конечной высоты. Ранее были проведены RANS-расчеты для случая одиночного полу-бесконечного цилиндра, который закреплен на вертикальной нагретой пластине и возмущает развивающийся на пластине пограничный слой [2].

Рассматривается трехмерное турбулентное течение вязкой жидкости вблизи вертикальной изотермической пластины, на поверхности которой расположен бесконечный периодический ряд цилиндров (рис.1). Решается система уравнений Рейнольдса и энергии, с описанием эффектов плавучести в приближении Буссинеска. Используется $k-\omega$ SST модель турбулентности. В расчетах варьируется высота препятствий и тип теплового граничного условия на их поверхности.

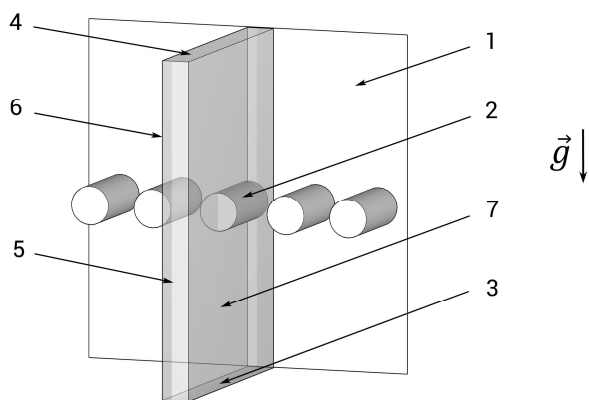


Рис. 1. Расчетная область и граничные условия: 1 - пластина, 2 - цилиндр, 3 – входная граница, 4, 5 – проницаемые границы, 6, 7 – плоскости симметрии

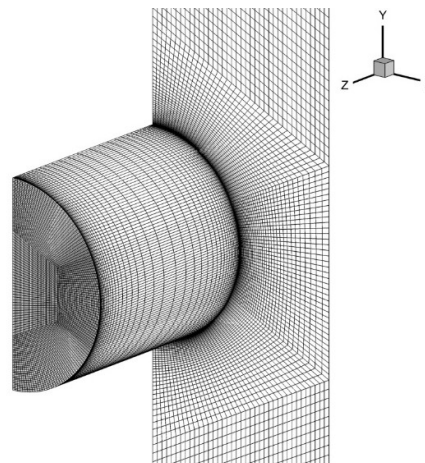


Рис. 2. Расчетная сетка вблизи цилиндра

^(*) М.Р.Котикова, kotikova.cat@yandex.ru

Расчетная область показана на рис. 1. Входная (3) и выходная (4) границы значительно удалены от фронта решетки. Расстояние от пластины (1) до внешней проницаемой границы (5) в пять раз превышает характерную толщину свободно-конвективного пограничного слоя перед фронтом решетки. Во входном сечении (3) задаются профили величин, полученные в результате предварительного расчета развития двумерного свободно-конвективного пограничного слоя. Расчеты выполнены по коду ANSYS Fluent 16. Расчетные сетки (см. рис. 2) включали полтора-два миллиона ячеек.

Предсказываемое свободно-конвективное течение в окрестности цилиндров существенно трехмерно; оно характеризуется формированием системы подковообразных вихревых структур, областью ускоренного потока между препятствиями и отрывными зонами с их тыльных сторон. На рис. 3 показано распределение напряжения трения на пластине, а на рис. 4 – распределение коэффициента теплоотдачи. Обе величины нормированы на значения в невозмущенном пограничном слое. Видно, что возмущающее действие поперечного ряда препятствий приводит к местному увеличению трения и теплоотдачи в пограничном слое в несколько раз.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-19-00082.

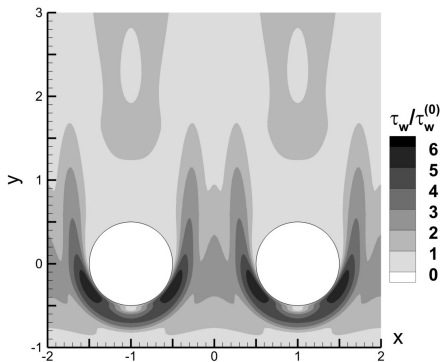


Рис. 3. Распределение напряжения трения на пластине.

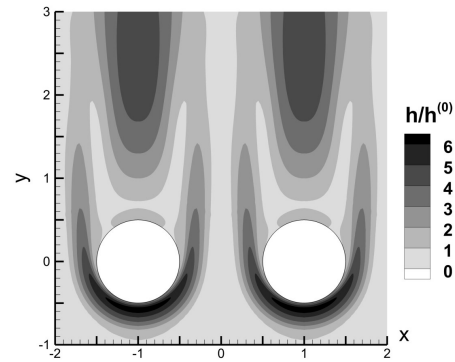


Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи на пластине.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Simpson R.L. Junction flows / Annual Review of Fluid Mech. 2001. V.33. P.415-43.
2. Levchenya A.M., Smirnov E.M., Zhukovskaya V.D., Ivanov N.G. Numerical study of 3D turbulent flow and local heat transfer near a cylinder introduced into the free convection boundary layer on a vertical plate / In: Proc. of the 16th Int. Heat Transfer Conf., August 10-15, 2018, Beijing, China, Paper IHTC16-22916.

M.R. Kotikova, A.M. Levchenya, M.A. Zasimova, E.M. Smirnov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

VERTICAL-PLATE FREE CONVECTION BOUNDARY LAYER DISTURBED BY A ROW OF CIRCULAR CYLINDERS: RANS-BASED NUMERICAL SIMULATION

ГЛУБОКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВЛАЖНЫХ ГАЗОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАСТИНЧАТОГО РЕКУПЕРАТОРА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ

Выделенная тема актуальна по причине неэффективного использования вторичных энергетических ресурсов. Среди ВЭР важное место занимают влажные газы. Глубокая утилизация теплоты влажных газов в конденсационных теплоутилизаторах (КТУ) позволяет существенно повысить эффективность теплотехнических установок и получить ряд преимуществ при их эксплуатации.

На данный момент проведен анализ методов расчета теплообменников влажных газов:

1. Метод расчета на основе коэффициента влаговываждения. Трудность расчета данным методом заключается в том, что не всегда известны параметры влажного воздуха на выходе, поэтому решение задачи проектирования осуществляют методом последовательных приближений с учетом функциональных особенностей работы агрегата.

2. Методы, основанные на соотношении Льюиса и уравнении Меркеля. Следует отметить, что непосредственное использование уравнения Меркеля в проектных расчетах затруднено из-за сложности определения энтальпии пленки конденсата, даже если принять, что она постоянна по поверхности.

3. Метод эквивалентной замены тепломассообмена во влажном воздухе теплообменом сухого воздуха. Указанный метод применим, если исходные данные на проектирование содержат сведения о тепловой нагрузке, расхода воздуха, а также на входные и выходные параметры воздуха в виде заданных значений температур и энтальпий.

На основе анализа сделаны выводы о необходимости разработки нового метода расчета теплообменников влажного воздуха, т.к. существующие методы расчета утилизаторов довольно сложные, но при этом их точность достаточно мала.

Целью работы является применение разработанного метода при использовании установок для утилизации теплоты влажных газов в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве на примере пластинчатого рекуператора в системах вентиляции помещений с открытыми водяными поверхностями (рис.1).

^(*) Д.А. Кравцов, kdzhurml@mail.ru

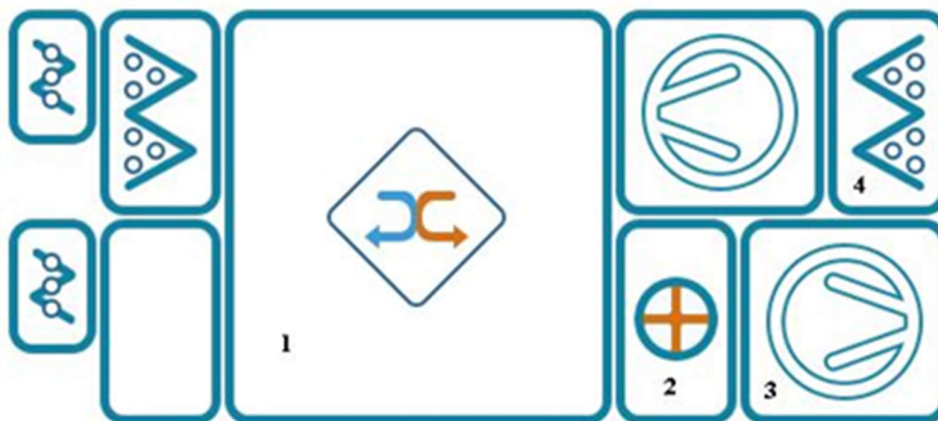


Рис. 1. Схема приточно-вытяжной системы с пластинчатым теплообменником.

Для достижения указанной цели поставлен ряд научно-технических задач, включающий:

- разработку математической модели для расчета и изучения закономерностей процессов тепло- и массообмена при течении парогазовых смесей в КТУ различного назначения и конструкций;
- численное и аналитическое исследование режимов работы различных видов;
- разработку инженерного метода расчета КТУ и теплоутилизационных установок, мер по повышению их эффективности, исключения нежелательных режимов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяев А.Б. Исследование распределения температур и энтальпий теплоносителя в поверхностных конденсационных теплообменниках, Теплоэнергетика, 2005.-№4. 7.-S.55-59 с.
2. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 1965. 608 с.
3. Горяев А.Б., Доброчеев О.В., Мотулевич В.П. Об аналогии процессов конвективного переноса с различными объемными источниками в пограничном слое // Журнал прикладной механики и технической физики.-1988.-№ 1-С. 133-143 стр.

D.A. Kravtsov, N.M. Savchenkova
Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI)

DEEP DISPOSAL OF THE HEAT OF HUMID GASES WITH THE HELP OF PLATE RECOVERATOR IN VENTILATION SYSTEMS

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ И ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ СИСТЕМАХ

Одним из перспективных направлений развития энергетического и теплообменного оборудования в различных областях техники является разработка микроструктурированных аппаратов [1]. Ограничения их применения определяются в значительной степени отсутствием надежных методов расчета процессов теплообмена, что сдерживает разработку оборудования в водородной и малой распределенной энергетике [2]. Для теплообменных аппаратов с регулярными насадками в последнее время изучаются физические процессы в сложных канальных системах [3]. На основе микроканальных систем создаются перспективные технологии отвода экстремально больших потоков тепла в ограниченном объеме [4]. В данной работе рассмотрены результаты физического и математического моделирования гидродинамики и теплообмена в компактных теплообменных устройствах, микроканальных системах охлаждения, реакторах водородной энергетики и получения синтетического топлива.

Рассмотрены методы моделирования процессов теплообмена в противоточных разделительных аппаратах со структурными насадками. В таких насадках жидкость стекает вниз и пар поднимается вверх в условиях интенсивного теплообмена на межфазной поверхности. На основе экспериментальных исследований выявлены закономерности пленочного течения жидкости в условиях определяющего влияния капиллярных сил и вихревого течения пара, развиты методы математического моделирования межфазного теплообмена, основанные на детальной структуре потоков жидкости и пара. Установлено, что основной причиной макромасштабной самоорганизации противоточного течения в установках со структурными насадками являются взаимосвязанные гидродинамические и массообменные процессы, приводящие к развитию конвективных течений и капиллярно-гравитационной неустойчивости, что снижает эффективность их применения и вызывает неравномерность потоков жидкости и пара.

Рассмотрены методы моделирования процессов теплообмена при спутном газожидкостном течении в пластинчато-ребристых испарителях и конденсаторах воздухоразделительных установок и систем сжижения природного газа. Разработана математическая модель теплообмена, основанная на получении решений для течения жидкости в углах и на стенках

^(*) В.В. Кузнецов vladkuz@itp.nsc.ru

каналов с последующей сшивкой решений на линии сопряжения. Расчеты показали, что формирование сухих пятен и увеличение коэффициента теплоотдачи в микрообласти вблизи контактной линии жидкость-пар-стенка типичны для испарения жидкости в компактных двухфазных теплообменниках. Предложенная модель тепломассообмена хорошо согласуется с известными экспериментальными данными и закладывает основы расчета компактных испарителей и конденсаторов различного применения.

Для обоснования применения микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных элементов в энергетике и электронике разработан новый метод расчета теплообмена при кипении в микроканалах, учитывающий совместно вклад подавления кипения, двухфазной конвекции и испарения в условиях вынужденной конвекции. Экспериментально установлены физические механизмы и предложены методы повышения критической тепловой нагрузки для кипения воды, диэлектрической жидкости и хладонов в микроканальных системах охлаждения, выявлены закономерности теплообмена при микроструйном охлаждении зон повышенного тепловыделения.

Синтезированы многокомпонентные каталитические наноструктуры на основе родия и палладия для проведения паровой и автотермальной конверсии углеводородов и спиртов. Разработана физическая и математическая модель конверсии углеводородов в микроканальном реакторе-теплообменнике, установлена высокая степень конверсии исходных продуктов в синтез-газ и жидкие углеводороды при последующем низкотемпературном синтезе Фишера-Тропша в микроструктурном многофазном реакторе.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет грантов Российского Научного Фонда (проект №16-19-10519) и РФФИ (проект №18-08-01282).

ЛИТЕРАТУРА

1. Abramson A.R., Tien C.L. Recent Developments in Microscale Thermophysical Engineering // *J. Microscale Thermophys. Eng.*, 1999. V. 3. P. 229.
2. Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // *Proc. Int. Heat Transfer Conf. IHTC14*, 2010. Washington. IHTC14-22570.
3. Hanley B., Chen C.C. New Mass-Transfer Correlations for Packed Towers // *AIChE*, 2012. V. 58. P. 132.
4. Mudawar I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2013. V. 5. P. 021012.

V.V. Kuznetsov
Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

FLUID FLOW AND HEAT AND MASS TRANSFER DURING PHASE CHANGE AND CHEMICAL REACTIONS IN MICROSTRUCTURED SYSTEMS

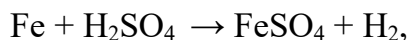
**МЕХАНИЗМ СЕКВЕСТИРОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА И СЕРЫ ПРИ
СЖИГАНИИ УГЛЕЙ С ДОБАВКАМИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ**

В последние годы внимание к угольной энергетике растет в связи с целым комплексом объективных причин [1]. Но сжигание углей в топках паровых и водогрейных котлов приводит к образованию антропогенных продуктов сгорания (наиболее опасными из которых являются оксиды серы и азота), борьба с которыми традиционными методами [2] является недостаточно эффективной. Поэтому предпринимаются многочисленные попытки сжигания углей в смеси с биомассой (например, [3]). Самой доступной как добавка к углю является древесная. Установлен синергетический эффект снижения выбросов оксидов азота и серы при сжигании древесно-угольных смесей [4]. Но пока не установлены механизмы процессов, приводящих к секвестированию оксидов серы и азота при совместном термическом разложении и последующем горении древесной биомассы и угля. Целью настоящей работы был анализ возможных механизмов процессов тепломассопереноса и физико-химических превращений при нагреве частиц мелкодисперсной древесины и угля до температур горения.

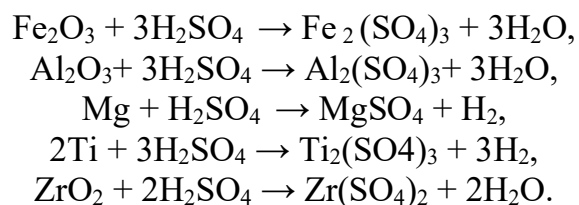
Выполнены экспериментальные исследования термического разложения и горения большой группы исследовавшихся древесно-угольных смесей с анализом газообразных и твердых продуктов высокотемпературных физико-химических превращений смеси угля и древесины. Установлено, что образовавшаяся после завершения процесса горения исследовавшихся смесей зола достаточно заметно отличается от твердых продуктов термического разложения и горения углей и древесины после их пиролиза без второй компоненты. На основании анализа и обобщения результатов выполненных экспериментов сформулированы две базовые гипотезы по механизмам секвестирования оксидов азота и серы при совместном термическом разложении древесной биомассы и угля.

Снижение концентрации оксидов углерода происходит за счет того, что древесина является углерод - нейтральной компонентой. Биомасса выделяет столько же углерода сколько было поглощено при росте древесины.

Снижение выхода оксидов серы происходит за счет их взаимодействия с парами воды (в результате образуется серная кислота) и последующими реакциями металлов и их оксидов, содержащихся в углях, при высоких температурах с серной кислотой:

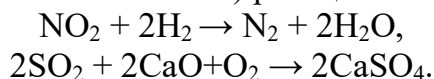


^(*) Г.В. Кузнецов, kuznetsovgv@tpu.ru



При этом образуются соли (сульфаты), которые являются частью золы, пары воды (которые могут участвовать в дальнейшем в реакциях окисления углерода с образованием водорода) и водород. Водород же, в свою очередь, может взаимодействовать с окислами серы с образованием серной кислоты и т.д.

В последние годы установлена зарубежными исследователями возможность протекания (при температурах более 900°C) реакций:



Анализ температурных диапазонов протекания перечисленных выше реакций показывает, что последние в условиях, соответствующих топочным пространствам типичных котельных установок, протекают с достаточно высокими скоростями. Поэтому возможно интенсивное образование продуктов термического разложения угля и древесины, интенсивно взаимодействующих в дальнейшем с секвестированием оксидов азота и серы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-29-24099.

ЛИТЕРАТУРА

1. Key world energy statistics // Dr. Fatih Birol. International Energy Agency, 2016.
2. Ежова Н.Н., Власов А.С., Делицын Л.М. Современные методы очистки дымовых газов // Экология пром. Производства. 2006. № 2. С.50-57.
3. Vershinina K.Yu., Iegorov R.I., Strizhak P.A. The ignition parameters of the coal-water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 107. P.10-20.
4. Кузнецов Г.В., Янковский С.А. Условия и характеристики зажигания композиционных топлив на основе угля с добавлением древесины // Теплоэнергетика. 2019. № 2. С.1-6.

G.V. Kuznetsov, S.A. Jankovsky
National research Tomsk Polytechnic University

THE MECHANISM OF NURSING OXIDES OF SULFUR AND OXIDES IN THE COMBUSTION OF COAL WITH ADDITIVES OF WOOD BIOMASS

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРОГАЗОВОГО ЦИКЛА

1. Введение. С развитием мировой энергетики технологии производства тепловой и электрической энергии становятся более сложными, из-за чего появляется необходимость предварительного моделирования технологического процесса для корректной оценки влияния тех или иных модификаций. Моделирования технологических процессов проводится с использованием таких программных пакетов, как Aspen Plus [1], Thermoflow [2], GS-code [3]. Эти программные инструменты обладают обширной базой данных о теплофизических и термодинамических свойствах большинства газовых сред, а также имеет в себе необходимые термодинамические модели для расчета теплоэнергетических процессов.

Целью данной работы является разработка термодинамической модели для расчета цикла ПГУ и её верификация на основе эксплуатационных данных реальной ТЭЦ. Расчетная модель впоследствии будет использована для оценки степени влияния внедряемых модификаций на экономические и энергетические показатели цикла, а также для оценки влияния перехода ПГУ с природного на искусственное топливо.

2. Моделирование ПГУ. Моделирования цикла ПГУ на природном газе является отправной точкой для последующей работы и расчетов теплоэнергетических циклов, работающих на газах реального состава, в том числе и на синтез-газах (продуктах переработки твердого и жидкого топлива). Разработка и верификация модели термодинамического расчета цикла ПГУ проводится на примере ТЭЦ с ГТУ типа GT13E2 производства Alstom. Данная ГТУ является широко распространенной в газовой теплоэнергетике [4].

Расчетная модель состоит из основных элементов промышленных ПГУ, а именно – ГТУ, КУ и ПТУ. Для каждого элемента при построении расчетной модели задаются такие параметры, как температура, давление, расход и выходная, либо потребляемая мощность установки. Для основных блоков по типу турбины, компрессора и так далее задаются такие параметры, как КПД оборудования, степень сжатия давления, степень расширения [5]. Все задаваемые параметры заимствованы из реально действующей ТЭЦ [6].

Расчетная модель одного из основных элементов, а именно узла ГТУ, изображена на рисунке 1.

^(*) И.П. Лазебный, anteymaster1@mail.ru

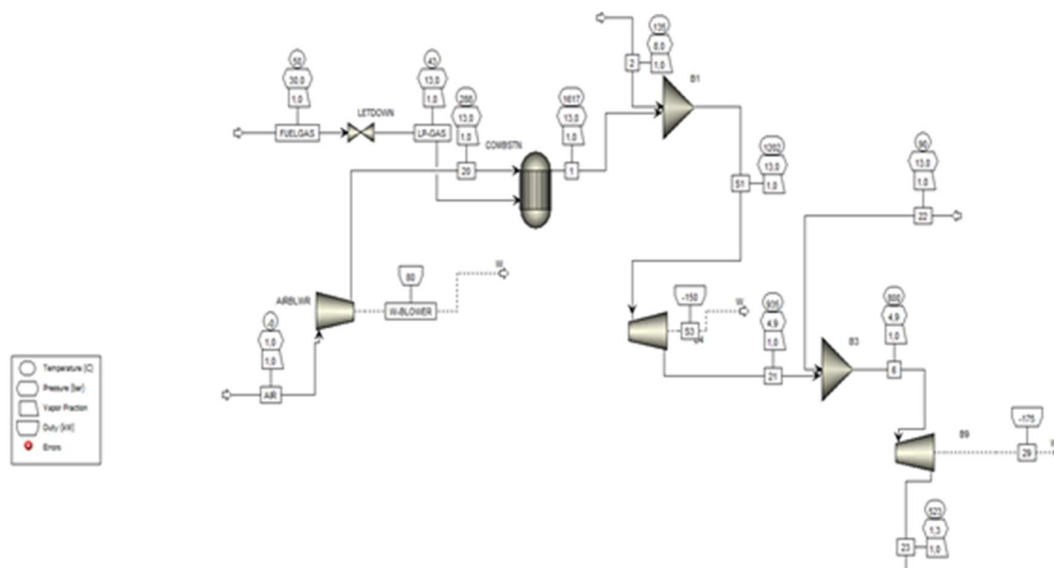


Рис. 1. Расчетная модель газотурбинной части ПГУ

На основе полученных данных, произведено сравнение выходных параметров.

4. Результаты исследования. Разработана термодинамическая модель для расчета цикла ПГУ. Расхождение полученных расчетных данных от эксплуатационных минимальны и составляют ~1-2%. Данная модель является базой, на основании которой будут производиться термодинамические расчеты при переходе ПГУ с природного газа на искусственный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schefflan R. Teach yourself the basics of Aspen Plus. - American Institute of Chemical Engineers and John Wiley & Sons, Inc. 2011. – P. 211.
2. Ryzhkov A.F., Bogatova T.F., Val'Tsev N.V. Development of low-temperature thermochemical conversion reactors for coal power engineering // Thermal Engineering. 2013. №12. С. 895-903.
3. Giuffrida A. On the effects clean-up temperature in IGCCs / A. Giuffrida, M. C. Romano // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010. Power for Land, Sea and Air (CT 2010). June 14-18. 2010. Glasgow, UK.
4. <https://dm.energy/ru/alstom-gt13e2>
5. Ольховский Г.Г. Газотурбинные и парогазовые установки сегодня // Электрические станции. 2015. № 1.
6. <https://www.tplusgroup.ru/org/sverdlovsk/organization>

I.P. Lazebny, P.S. Filippov, A.F. Ryzhkov
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A THERMODYNAMIC MODEL FOR CALCULATION OF A STEAM-GAS CYCLE

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УГЛЯ И КОКСА ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ И ИХ ПРЕДШЕСТВЕННИКАМИ

Зажигание и последующий выход на стабильное горение высокоуглеродистых энергетических углей и коксов при пуске энергетических установок, связаны с подводом большого количества тепла, обеспечивающего прогрев топочного пространства котлоагрегата до высоких температур. Одним из современных технологических решений направленных на сокращение или полное исключения расхода дополнительного топлива (природный газ или мазут) в прохождении пусковых режимах работы энергетического котла, является использование катализирующих агентов.

Существующий опыт каталитического зажигания твердых топлив основан на применении оксидов различных металлов [1], вводимых в состав твердого топлива методом механической активации.

В нашей предыдущей работе [2] было установлено, что использование добавок солей (нитрат, сульфат и ацетат меди) в отличие от оксидов металлов, оказывали более существенное воздействие на перенос процесса интенсифицируемого окисления углей в низкотемпературную область. Данный эффект объясняется частичным или полным разложением добавки соли с выделением соответствующих газофазных продуктов окисления и последующим образованием оксида металла, имеющего высокую каталитическую активность.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса интенсифицируемого окисления энергетического угля и кокса оксидами металлов и их предшественниками в виде солей.

В работе был использован образец каменного угля марки Т (шахта Алардинская Кузбасского угольного бассейна) и кокс, полученный после пиролизической обработки соответствующего топлива. Технические характеристики исследуемых образцов определялись согласно стандартным методам [3] и приведены в таблице 1.

В качестве активирующих добавок были использованы нитраты меди и железа, которые наносились методом пропитки по влагоемкости. Массовая доля нитратов в образцах (в пересчёте на сухую соль) составляла 5%. Для интегрирования и равномерного распределения оксидов металлов в объеме угля

(*) К.Б. Ларионов, laryk070@gmail.com

и кокса, модифицированные нитратами образцы проходили термообработку в муфельной печи при температуре соответствующей разложению солей.

Экспериментальное исследование процесса окисления проводилось с помощью термического анализатора. Образец массой ~ 15 мг подвергался нагреванию в корундовом тигле с перфорированной крышкой в интервале температур 25-600 °С при скорости нагрева 2,5 °С/мин. В качестве окислительной среды использовали смесь воздуха (60 мл/мин) и азота (10 мл/мин).

По данным термического анализа установлено, что температура начала интенсивного окисления t_i при введении промоторов снизилась на 50-200 °С.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов

Характеристика	Ед. измерения	Уголь марки Т	Кокс
Влажность W^r	масс. %	0,3	0,1
Выход летучих V^r		13,1	1,7
Зольность A^r		16,5	17,2
Углерод C^r		70,1	81,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Gong X., Guo Z., Wang Z. Reactivity of pulverized coals during combustion catalyzed by CeO₂ and Fe₂O₃ // *Combust. Flame*, 2010. V. 157. P. 351–356.
2. Larionov K.B., Mishakov I.V., Gromov A.A., Zenkov A.V. Change of brown coal oxidation kinetic characteristics by promoting additives appending in the form of copper salts // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017. V. 891 (1). 012239
3. Tabakaev R.B., Kanipa I.V., Astafev A.V., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Zavorin A.S., Yakovlev V.A. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis // *Fuel*, 2019. V. 245. P. 29-38.

K.B. Larionov¹, K.V. Slyusarsky¹, I.V. Mishakov²
¹Tomsk polytechnic university,
²Boreskov Institute of Catalysis SB RAS

PROMOTION OF OXIDATION OF ENERGY COAL AND CHAR BY METAL OXIDES AND THEIR PRECURSORS

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КАРТИН ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНИ НС ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА С ИЗМЕНЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ОДНОЙ ЛОПАТКИ

Опыт применения CFD моделирования в работах кафедры «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» показал высокую результативность при проведении расчетов, для стационарной постановки задачи и определения характеристики турбокомпрессора [1]. Моделирование характеристик ступени центробежного компрессора, при нестационарной постановки задачи, требует больше ресурсов, как по объему сетки 18-24 млн. элементов, так и по времени расчета 5-10 дней в суперкомпьютерном центре «Политехнический» СПбПУ при параллельном запуске на 8 узлах. Полученные результаты картин течения при нестационарном режиме не достаточно точно показывают и соотносятся с экспериментальными данными полученными [3] на режимах предсрыва, вращающегося срыва и развитого вращающегося срыва.

Работы по экспериментальному изучению предпомпажного состояния центробежного компрессора проводились на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» Измайловым Р.А. [3], были получены характеристики нестационарных процессов в проточной части центробежного компрессора. В настоящее время проводится моделирование нестационарных процессов с помощью программы ANSYS CFX, первоначальной целью проведения этих работ является достижение качественного совпадения картин течения, значений пульсаций давления и частот пульсаций на режимах предсрыва, вращающегося срыва и развитого вращающегося срыва. При рассмотрении причин расхождения картин течений, полученных для эксперимента и моделирования, было предположено влияние идеальной геометрии на результат моделирования, что косвенно подтверждалось натурными испытаниями, проведенными под руководством Измайлова Р.А., при проведении натуральных исследований было выявлено влияние точности сборки и изготовления элементов проточной части центробежной ступени на нестационарные характеристики. Поэтому было решено внести искажение в расчетную модель для CFD. В качестве искажения геометрии выбрано изменение толщины лопатки рабочего колеса на 1 мм. Ожидаемые результаты искажения геометрии - это стабилизация зон срыва, уменьшение количества зон срыва. Так же полученный результат таких расчетов может быть применен при моделировании характеристик центробежных компрессорных установок, с

(*) А.А. Лебедев, laa7777@yandex.ru

повреждениями лопаток рабочего колеса в процессе эксплуатации: абразивным выкрашиванием, отламыванием, или повреждениями, полученными при попадании в проточную часть посторонних предметов.

Основные характеристики расчетной модели и граничные условия: для рабочего колеса количество ячеек сетки 10 285 640 элементов, размер пристеночной ячейки – 0,01 мм, количество лопаток 15, для лопаточного диффузора использовалась сетка с количеством ячеек 6 699 840 элементов, размер пристеночной ячейки – 0,01 мм, количество лопаток 14, для обратно направляющего аппарата использовалась сетка с количеством ячеек 11 432 567 элементов, размер пристеночной ячейки – 0,01 мм, количество лопаток 14, граничные условия Inlet: полное давление 101788 Па; полная температура 298К, Outlet: статическое давление 123734 Па. Интерфейс перехода: условия вращающихся стенок, условия статичных стенок. Частота вращения ротора: 9780 об/мин. Модель турбулентности: Shear Stress Transport. Рабочее тело – идеальный газ воздух; учитывается, что его теплоёмкость и динамическая вязкость меняются в зависимости температуры.

В результате расчетов CFD на режиме предсрыва и вращающегося срыва получены картины течений для целого колеса 360 градусов даже при стационарном расчете присутствует отрыв потока на лопатке, геометрия которой изменена. При нестационарном расчете не идеальной геометрии наблюдаются картины течений более качественные и близкие к экспериментально исследованным [2], чем при моделировании идеальной геометрии, при этом не достигается полное совпадение картин, возможно это связано с работой интерфейса между колесом и неподвижным статором, а также не учетом уплотнений в расчетной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Danilishin A.M., Kozhukhov Y.V., Yun V.K. Multi-objective optimization for impeller shroud contour, the width of vane diffuser and the number of blades of the centrifugal compressor stage based on the CFD calculation. London, IOP Conference Series. 2015, 16.
2. Нгуен Минь Хай. Информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора: дис. к. техн. наук. СПб: СПбПУ, 2007. 190 с.
3. Izmaylov R., Lebedev A. Centrifugal compressor surge detecting method based on wavelet analysis of unsteady pressure fluctuations in typical stages; London, IOP Conference Series Materials Science and Engineering 2015, vol. 90.

A.A. Lebedev¹, S.M. Lebedeva¹, N. Hai²

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

²Petrovietnam exploration production corporation-integrated technical center

UNSTEADY FLOW PATTERN SIMULATION IN THE NC STAGE CENTRIFUGAL COMPRESSOR WITH A MODIFIED GEOMETRY OF ONE BLADE

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОТДАЧИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО УСТРОЙСТВА С ЗАКРУЧЕННЫМ ТЕЧЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Интенсификация теплоотдачи в кольцевых каналах рекуперативных устройств обеспечивает не только повышение их тепловой эффективности, но также тепловую защиту наиболее термически напряженных участков [1,2].

В работе исследовались аэродинамика и теплоотдача кольцевого канала 2 (рис.1а) сужающегося по длине за счет увеличения диаметра внутренней поверхности 1, которая имела форму усеченного конуса.

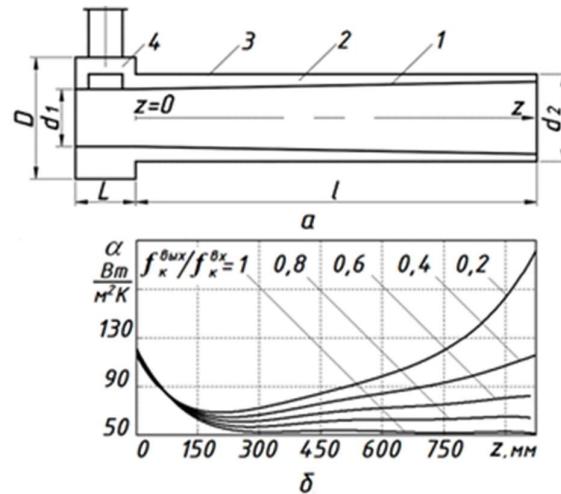


Рис. 1. Схема сужающегося кольцевого канала (а) и изменение коэффициента теплоотдачи по длине внутренней поверхности (б) при различных f_k^{6lx} / f_k^{6x}

Внутренний диаметр d_1 при $z = 0$ (z – продольная координата, отсчитываемая от начала кольцевого канала вдоль его оси) равнялся 152 мм. В рассмотренных пяти вариантах соотношение площадей поперечных сечений на выходе из канала f_k^{6lx} (при $z = l$) и на входе в него f_k^{6x} (при $z = 0$) последовательно уменьшалось от 100% до 20% с шагом в 20%. Диаметр d_1 в выходном сечении при этом увеличивался от 152 мм до 178,1 мм, а угол конуса от 0° до $1,8^\circ$. Длина кольцевого канала и диаметр наружного цилиндра 3 оставались неизменными и равными соответственно $l = 840$ мм, $d_2 = 184$ мм. Геометрические размеры генератора закрутки потока приведены в статье [1].

^(*) Е.В. Панкратов, iarphen@gmail.com

Верификация результатов численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 показала удовлетворительное совпадение с опытными данными, полученными на физической модели аналогичного прямого кольцевого канала [1].

Уменьшение площади поперечного сечения сужающегося кольцевого канала в направлении выходного торца, приводит к перераспределению полной скорости потока и всех ее составляющих. Крутка потока по длине понижается за счет уменьшения тангенциальной скорости, и одновременного увеличения осевой. При $f_K^{6bx} / f_K^{6x} < 0,6$ в части канала примыкающей к генератору закрутки полная скорость снижается из-за уменьшения вращательной скорости, а во второй половине возрастает за счет увеличения осевой. Сужение приводит к увеличению сопротивления канала и выхода из него, а в результате и к возрастанию общего сопротивления устройства.

Увеличение скорости, структурная перестройка потока, снижение консервативного влияния массовых сил с уменьшением f_K^{6bx} / f_K^{6x} приводят к интенсификации теплоотдачи на внутренней поверхности кольцевого канала (рис. 16). На начальном участке канала, который примыкает к генератору закрутки и ограничен безразмерной координатой \bar{z} (отнесенной к текущему эквивалентному диаметру) равной 2,5, теплоотдача определяется условиями истечения закрученного потока в кольцевой канал и уменьшается по длине. На основном участке, при $\bar{z} \geq 7$, где определяющее влияние на аэродинамику и теплоотдачу внутренней поверхности оказывает степень сужения канала, коэффициент теплоотдачи растет по длине тем больше, чем меньше отношение f_K^{6bx} / f_K^{6x} . Так при $f_K^{6bx} / f_K^{6x} = 0,2$ местная теплоотдача вблизи выходного сечения в 3,6 раза превышает ее значение в прямом канале, а средняя по длине примерно в 1,8 раза. Оптимальное значение коэффициента теплогидравлической эффективности достигается при $f_K^{6bx} / f_K^{6x} \approx 0,5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвективный теплообмен в кольцевом канале с циклонным генератором закрутки / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, С.И. Осташев и др. // Известия вузов. Энергетика. 1990. № 9. С.86–90.
2. Леухин Ю.Л., Панкратов Е.В. Рекуперативно-горелочный блок. Патент 2682214 РФ МПК F23 L15/04, Оpubл. 15.03.2019, Бюл. № 8.

Yu.L. Leukhin, E. V. Pankratov
Lomonosov Northern (Arctic) Federal University,

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN THE ANNULAR CHANNEL OF RECUPERATIVE DEVICE WITH SWIRLING FLOW OF HEAT CARRIER

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ ПОДЪЕМНОМ МГД-ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ОБОГРЕВАЕМОМ КАНАЛЕ

Жидкие металлы рассматриваются в качестве теплоносителей в реакторах на быстрых нейтронах, а также, весьма вероятно, в термоядерном реакторе для охлаждения первой стенки, blankets и дивертора и для наработки трития. В термоядерном реакторе жидкометаллические системы подразумевают работу в сильном магнитном поле. Влияние магнитного поля на течение жидких металлов в канале зависит от взаимной ориентации магнитного поля и направления движения жидкости. При этом магнитное поле избирательно действует на вторичные вихревые течения термогравитационной конвекции, тормозя или усиливая последние.

В настоящее время объединенная группа из МЭИ и ОИВТ РАН проводит комплексные экспериментальные и расчетные исследования МГД-теплообмена при подъемном течении жидкого металла в компланарном магнитном поле в вертикальном прямоугольном канале. Такая схема течения применима к жидкометаллическим модулям двойного охлаждения, предназначенным для наработки трития в blankets (международный термоядерный реактор) ИТЭР [1].

Исследуемая задача показана на рисунке 1. Рассматривается подъемное течение вязкой несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами в канале прямоугольного поперечного сечения. Жидкость движется под действием приложенного градиента давления. Стенки канала обогреваются равномерным по длине и периметру тепловым потоком $q_1 = q_2$.

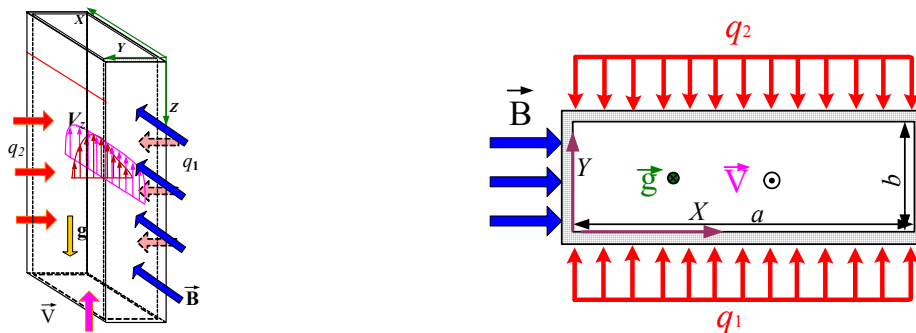


Рис. 1. Геометрия задачи и схема обогрева

(*) Я.И. Листратов, yaroslav.listratov@gmail.com

Вычислительная схема основана на методе конечных разностей. Пространственная дискретизация имеет второй порядок точности и осуществляется с помощью структурированной не полностью совмещенной сетки, которая подразумевает локализацию всех искомых переменных в узловых точках [2]. Интегрирование по времени осуществляется с использованием явного метода Адамса-Башфорта второго порядка точности, на первом шаге применяется метод Эйлера первого порядка точности. Для обеспечения связи между скоростью и давлением используется классический проекционный метод, основанный на теореме о разложении Гельмгольца-Ходжа.

Для анализа и сравнения с экспериментальными данными [3] использовались следующие режимные параметры: $Re = 7000-20000$, $Gr = 0-6 \cdot 10^8$, $Na = 0-500$, $Pr = 0.025$.

Полученные результаты показывают, что влияние термогравитационной конвекции на осредненные и пульсационные характеристики в отсутствие и при наличии компланарного магнитном поле неоднозначное и требует специального анализа.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (грант №13.9619.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Smolentsev, S., Moreau, R. & Abdou, M., "Characterization of key magnetohydrodynamic phenomena for PbLi flows for the US DCLL blanket," Fusion Eng.Design, 83 771-83 (2008).
2. Krasnov, D., Zikanov, O., Boeck, T., ."Comparative study of finite difference approaches in simulation of magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds number" (2011)
3. P.V. Kostychev, I. I. Poddubnyi, N. Yu. Pyatnickaya, N.G. Razuванov, and E. V. Sviridov, "Peculiarities of Heat Transfer in Flow of a Liquid Metal in Vertical Duct in Coplanar Magnetic Field" (2018)

Y.I. Listratov^{1, 2}, T.A. Gubarevich^{1, 2}

¹National Research University Moscow Power Engineering Institute,

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF MIXED CONVECTION OF A LIQUID METAL MHD UPFLOW IN THE VERTICAL DUCT

Д.С. Литун^(*), Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Е.А. Шорина
ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО ВТИ), г Москва

ФРАГМЕНТАЦИЯ И АГЛОМЕРАЦИЯ БИОМАССЫ ПРИ ПИРОЛИЗЕ И СЖИГАНИИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Существенными проблемами сжигания биомассы, прежде всего отходов сельскохозяйственных и некоторых промышленных предприятий, в кипящем слое с традиционным наполнителем (песком) являются фрагментация топливных частиц и агломерация слоя. Фрагментация увеличивает унос горючих из слоя и механический недожог, а агломерация может приводить к укрупнению частиц материала слоя, их спеканию, ухудшению и даже прекращению ожигения. Представлены результаты экспериментальных исследований процессов первичной фрагментации частиц биомассы и агломерации частиц материала слоя при пиролизе и газификации в низкотемпературном кипящем слое. Исследования процессов первичной фрагментации проводились с использованием лабораторной трубчатой печи "SNOL" с диаметром рабочей камеры 35 мм, оснащенной системой подвода и контроля расхода инертного газа (азот), и электронного сканирующего микроскопа "Vega3LMH". Для определения химического состава микроскоп оснащен системой энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) AZtecEnergy производства фирмы «Oxford Instruments». Рассмотрены и проанализированы влияние температуры слоя, размера и формы частиц на количественные характеристики и критерии первичной фрагментации, причины и характер растрескивания частиц древесной биомассы (древесина ели).

Анализ результатов опытов на лабораторной установке показал, что увеличение температуры процесса в диапазоне 800-950⁰С и исходного размера частиц биомассы увеличивает вероятность и интенсивность фрагментации частиц в процессе быстрого нагрева. Соотношение продольного и поперечного размеров оказывает существенное влияние на процесс фрагментации и должно рассматриваться как один из основных факторов, воздействующих на фрагментацию наряду с температурой и размером частиц биомассы. При одинаковом эквивалентном диаметре продолговатые частицы более склонны к фрагментации по сравнению с квазикруглыми (кубическими). Для древесных частиц ели в рассматриваемом диапазоне температур и эквивалентных диаметров исходных частиц характерна фрагментация вследствие напряжений выхода летучих, образующая крупные фрагменты. Вклад температурных напряжений в фрагментацию незначителен, хотя и несколько возрастает с

^(*) Д.С. Литун, litoun@gmail.com

увеличением температуры процесса. Распад кубических древесных частиц на фрагменты происходит вследствие образования крупных трещин, возникающих на поверхности частицы и развивающихся к её центру. Механизм растрескивания представляет собой последовательный, главным образом продольный, разрыв стенок полых элементов микроструктуры древесины (трахеид) под действием напряжений выхода летучих. Образованию трещин способствуют дефекты и неровности на поверхности частиц. Вероятность зарождения трещин наиболее велика в местах выхода на поверхность частицы границ раннего (весеннего) и позднего (осеннего) прироста древесины (годовых колец).

Изучение микроструктуры и элементного состава коксовых частиц с применением ЭДС показало, что на поверхности частиц существует тонкий (0-15 мкм) наружный слой, имеющий повышенное содержание минеральных компонентов). На поверхности коксовых частиц, полученных при температуре 950 °С, обнаружены микросферы размером 13-23 мкм, имеющие повышенное содержание серы. Сферическая форма, вероятно, является следствием перехода отдельных компонентов на поверхности коксовых частиц в пластическое состояние. Наружный слой на поверхности коксовых частиц, включая поверхность микросфер, имеет включения неправильной округлой формы размером от одного до нескольких мкм или целиком состоит из них. По данным микроэлементного анализа зоны поверхности коксовых частиц с максимальным содержанием хлора, как правило, совпадают с зонами максимальных содержаний натрия и калия. Это указывает на наличие хлоридов натрия и калия на поверхности.

С целью определения влияния температуры и концентрации щелочных элементов на начало агломерации и состав агломератов выполнены исследования в условиях отсутствия развитого массообмена (предельный вариант обработки в плотном слое малой высоты). Для исследования готовились смеси песка и золы различных топлив (лузга подсолнечника, древесина, пеллеты). Показано, что для чистого песка и золы биомассы агломерации не происходит даже при температуре 900 °С. Выполнены исследования процессов агломерации в широком диапазоне концентраций щелочных элементов в смеси с песком.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-08-00758

D.S. Litun, G.A. Ryabov, O.M. Folomeev, E.A. Shorina
All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI)

**FRAGMENTATION AND AGGLOMERATION OF BIOMASS
IN FLUIDISED BED PYROLYSIS AND COMBUSTION**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Вибрация конструкций под воздействием потоков является негативным фактором, который может вызывать аварийные ситуации в контурах перспективного энергетического оборудования. Применение тяжелых жидкометаллических теплоносителей (эвтектический сплав свинец-висмут, свинец) для охлаждения тепловыделяющих элементов реакторных установок с замкнутым топливным циклом приводит к усугублению этой проблемы, т.к. плотность расплава теплоносителя сравнима с плотностью материалов элементов конструкции. Поэтому необходимо производить подробное исследование данной проблемы с помощью численных и экспериментальных методов. В связи с этим, последнее время появился ряд работ, в которых производилось расчетное исследование течений ТЖМТ в элементах реакторных установок [1,2]. Целью данной работы является проведение исследования инициированной потоком вибрации продольно обтекаемого стержня в кольцевом канале.

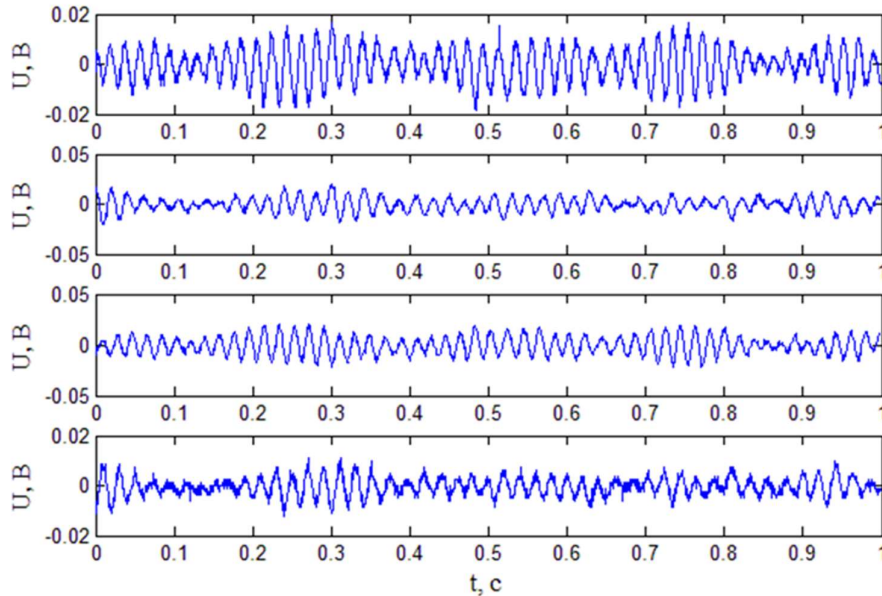
Работы проведены в кольцевом канале. Диаметр внутренней трубки 12 мм, внешней трубы – 26 мм. Предложен новый метод измерения перемещения стержня, с помощью емкостного датчика. Проведена апробация датчика в прозрачной трубе с помощью оптического метода. Пример временных сигналов, полученных одновременно с помощью четырех датчиков приведен на рисунке 1. Данные о перемещении для каждого датчика приведены в вольтах. Для перевода сигнала датчика в единицы измерения длины применялась калибровка. Можно увидеть, что для приведенного режима амплитуда колебаний не постоянна во времени и изменяется. Также получены режимы, при которых амплитуда колебаний была примерно постоянной во времени. Обработка сигналов позволяет определить отклонение оси трубки от вертикали в данный момент времени. Также возможно получить данные о частоте колебаний стержня.

В результате, получены данные о влиянии расхода жидкости на возникновение вибрации консольно-закрепленных стержней разной длины. Таким образом, составлена база данных об амплитудно-частотных характеристиках колебаний стержней в широком диапазоне входных условий. Данные могут быть применены для верификации и валидации расчетных кодов. На основе созданной экспериментальной базы в дальнейшем будут проведены

^(*) П.Д. Лобанов, lobanov@itp.nsc.ru

исследования течения ТЖМТ (эвтектический сплав свинец-висмут) в экспериментальной модели ТВС.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, гос. Задание № III.22.7.3.



а – сенсор 1, б – сенсор 2, в – сенсор 3, г – сенсор 4

Рис. 1. Временные зависимости сигналов с разных сенсоров,
 $L = 300$ мм, $Q_{ж}=5,4$ т/ч

ЛИТЕРАТУРА

1. Merzari E., Fischer P., Yuan H., Van Tichelen K., Keijers S., De Ridder J., Degroote J., Vierendeels J., Doolaard, H., Gopala V.R., Roelofs F. Benchmark exercise for fluid flow simulations in a liquid metal fast reactor fuel assembly // Nuclear Engineering and Design. 2016. V. 298. P. 218–228.
2. De Santis D., Shams A., Analysis of flow induced vibrations and static deformations of fuel rods considering the effects of wire spacers and working fluids // Journal of Fluids and Structures. 2019. V. 84. P. 440–465.

P.D. Lobanov, V.G. Meledin, N.A. Pribaturin,
A.I. Svetonosov, I.V. Shchepikhin
IT SB RAS, Novosibirsk

EXPERIMENTAL STUDY OF VIBRATION OF A VERTICAL ROD IN LIQUID FLOW

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА МЕТАЛЛА ПО ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОГО СТЕРЖНЯ

Современные тенденции развития реакторных установок предполагают строительство реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Одной из важнейших задач при создании проектов современных реакторных установок с жидкометаллическим охлаждением является обоснование их безопасности. Одними из самых опасных для подобных реакторных установок являются гипотетические аварии с потерей расхода и резким вводом реактивности без срабатывания активных и пассивных систем защиты, при которых возможно термическое разрушение твэлов, ТВС и всей активной зоны.

Образующийся в результате плавления твэлов расплав начинает перемещаться по их неповрежденным поверхностям. Скорость и направление движения расплава оказывают существенное влияние на протекание аварийного процесса из-за наличия обратных связей с мощностью реактора. По этой причине, расчетно-экспериментальное изучение особенностей движения расплава является актуальной задачей. Поскольку изучение аварийных процессов в самой реакторной установке не представляется возможным, наиболее реалистичным является проведение исследований с использованием модельных экспериментов.

Настоящая работа посвящена подходам и основным результатам исследования движения жидкого металла по поверхности нагретого стержня. В экспериментах исследовалось движение расплава металла по поверхности имитатора топливного столба, как при гравитационном стекании, так и при обдуве газовым потоком. В ходе исследования были получены данные об особенностях течения жидкого металла по цилиндрической поверхности. Показано формирование ручейков и капель, а также их отрыв от поверхности при обдуве газовым потоком.

Проведено экспериментальное исследование плавления модели твэла в пучке из 7 стержней (см. Рисунок 1). Проведен анализ эволюции температуры и динамики плавления. Полученные результаты могут быть полезны для понимания закономерностей движения расплава при тяжелых авариях на атомной электростанции. Также результаты очень важны для разработки моделей процессов, которые происходят во время аварий в ядре атомных электростанций. Планируется дальнейшее развитие экспериментальной установки. Например, необходимо исследовать плавление всех 7 стержней

^(*) П.Д. Лобанов, lobanov@itp.nsc.ru

сборки одновременно. Также необходимо обеспечить исследования различными значениями температуры и расхода аргона. Кроме того, планируется проведение высокоскоростной визуализации происходящих процессов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант № 18-79-10013)

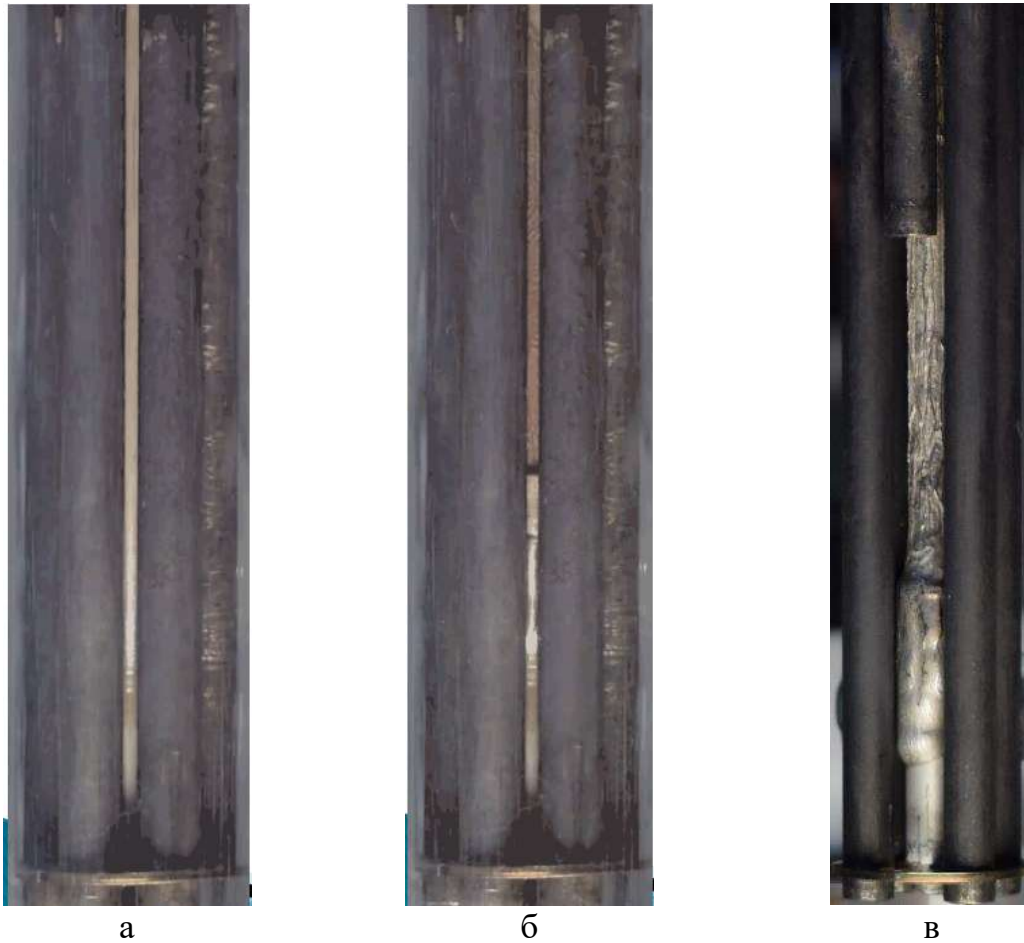


Рис. 1. Фотографии рабочего участка до (а) и после (б) эксперимента и при проведении посттестового анализа (в).

P.D. Lobanov, A.I. Svetonosov, E.V. Usov
IT SB RAS, Novosibirsk
NSI RAS, Novosibirsk branch, Novosibirsk

**EXPERIMENTAL STUDY OF METAL MELT MOOVING
ON SURFACE OF HEATED ROD**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА НАНОЧАСТИЦ НА СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Проблема интенсификации теплообмена и связанные с ней задачи экспериментального и теоретического исследований приобретают в настоящее время значение самостоятельной, быстро развивающейся области учения о теплообмене. Во всех машинах, оборудовании и технологиях возникает потребность интенсивного отведения тепла, для чего используется различного рода теплообменное оборудование. Актуальность этой проблемы определяется стремлением добиться максимальной компактности при минимальной материалоемкости, повышению интенсивности работы теплообменных устройств в сочетании с желанием сократить затраты энергии.

Одним из путей решения проблемы интенсификации процесса теплообмена является использование в теплообменных устройствах в качестве теплоносителей жидкостей с примесью наночастиц различного состава, получивших название «наножидкости». Несмотря на некоторые ограничения, такие как относительно высокие затраты на подготовку и вопросы стабильности, наножидкости могут использоваться в качестве потенциальных охлаждающих жидкостей следующего поколения, использующиеся для улучшения переноса тепла через такую испаряющуюся тонкую пленку. Экспериментальные и численные результаты показали, что наножидкости имеют гораздо более высокую теплопроводность, более высокие коэффициенты теплоотдачи, более высокие критические тепловые потоки и лучшую смачиваемость, чем обычные чистые жидкости [1-6].

Исследования скорости испарения были проведены для наножидкостей на основе дистиллированной воды и наночастиц диоксидов кремния (SiO_2) и циркония (ZrO_2), оксида алюминия (Al_2O_3), а также наночастиц алмаза. Средний размер наночастиц SiO_2 равен 25 нм, для частиц ZrO_2 – 105 нм, для частиц Al_2O_3 – 43 нм и алмаза – 5 нм. Наночастицы оксидов металлов были приобретены у компании «Плазмотерм», г. Москва. Порошок алмазов УДА-С (ТУ 84-1124-87) был приобретен у ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Объемная концентрация наночастиц оксидов металлов варьировалась от 0.5 до 6%, объемная концентрация наночастиц алмаза варьировалась от 0.0625 до 1%. Скорость испарения наножидкости была измерена с помощью синхронного термоанализатора STA 449 C Jupiter (фирмы NETZSCH), сочетающего одновременное измерение изменений массы (термогравиметрия) и тепловых потоков (дифференциальная

(*) А.С. Лобасов, perpetuityrs@mail.ru

сканирующая калориметрия). В процессе синхронного термического анализа исследуется поведение образца в условиях заданной температурной программы. Измеряемыми величинами являются изменение массы, абсолютная температура образца и температурная зависимость разницы между тепловыми потоками образца и эталона. Измерения проводятся синхронно на одном и том же образце в одних и тех же условиях. В данной работе образцы наножидкости подвергались нагреванию от температуры 25°C до 50°C по температурной программе со скоростью 1.0 К/мин в динамической атмосфере воздуха со скоростью потока 30 мл/мин с последующей изотермической выдержкой в течение 30 мин. Для всех образцов в процессе эксперимента температура совпадала с достаточно высокой степенью точности. Для каждого образца наножидкостей было проведено по три независимых измерения. Расхождения по скорости испарения между этими измерениями не превышали 4%.

Анализ результатов экспериментов показывает, что зависимость скорости испарения наножидкости с хорошей точностью описывается корреляцией вида $w(\varphi) = 1 + a\varphi^b$. Коэффициенты a и b были определены для всех исследуемых наножидкостей: $a = 0.115$, $b = 0.428$ – для частиц алмаза; $a = 0.033$, $b = 0.551$ – для частиц диоксида кремния; $a = 0.034$, $b = 0.419$ – для частиц оксида алюминия; $a = 0.053$, $b = 0.294$ – для частиц диоксида циркония.

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 18-48-243019 «Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на скорость испарения жидкостей». Исследования испарения суспензии наноалмазов выполнено в рамках гос. задания СФУ (№. 16.8368.2017).

ЛИТЕРАТУРА

1. Минаков А.В., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Пряжников М.И., Лобасов А.С. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // ИФЖ, 2015. Т. 88. № 1. С. 148–160.
2. Minakov A.V., Guzei D.V., Pryazhnikov M.I., Zhigarev V.A., Rudyak V.Y. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel / IJHMT, 2016. V.102. P.745–55.
3. Guzei D.V., Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Dekterev A.A. Measuring the heat-transfer coefficient of nanofluid based on copper oxide in a cylindrical channel // Tech. Phys. Lett, 2014. V. 40. Is. 3. P. 203–206.

A.S. Lobasov^{1,2}, A.V. Minakov^{1,2}

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation,

²Institute of Thermal Physics, Novosibirsk, Russian Federation

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE NANOPARTICLES MATERIALS EFFECT ON THE NANOFLUIDS EVAPORATION RATE

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОПОДГОТОВКИ УГЛЯ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Актуальность работы обусловлена тем, что на территории России, как в городской, так и сельской местности для теплоснабжения функционирует большое количество котельных, обеспечивающих тепловой энергией социальные объекты и население. Анализ показывает, что роль котельных (в сравнении с крупными энергоисточниками) существенно возрастает на территориях: с невысокой численностью населения; в труднодоступных; децентрализованных районах.

Основными типами теплоисточников при децентрализованном теплоснабжении являются котельные с котлами небольшой единичной мощностью (до 1 Гкал/ч) со слоевым сжиганием твердого топлива и ручной его загрузкой. Очистка дымовых газов в котельных данной группы, как правило, не осуществляется или осуществляется неудовлетворительно.

В отличие от субъектов центральной части России в Сибирских и Дальневосточных регионах страны основным топливом для котельных является уголь, что связано с наличием его существенных запасов и относительно невысокой стоимостью для потребителей.

Известно, что при сжигании органического топлива в различных энергоустановках характерными вредными примесями являются: твердые частицы, оксиды серы и азота. Как правило, количество выбросов вредных веществ зависит от качественного состава топлива, его количества, условий сжигания в котельных установках и работы очистного оборудования.

При оценке объемов выбросов выявлено, каким образом изменение одной из качественных характеристик топлив (влажности, зольности, содержания серы и азота и др.) при одинаковых условиях сжигания и способах очистки может повлиять на конечный результат - количество выбросов. Так, существует прямая зависимость объемов выбросов от количества сожженного топлива и обратная – от качественных характеристик топлив (чем лучше топливо, тем ниже выброс). Однако влияние качественных характеристик топлив не столь однозначно [1]. Например, прямую зависимость на объем выбросов имеет зольность, содержание серы и азота в исходном топливе. Теплотворная способность топлив, в случае определения количества выбросов оксидов азота, имеет прямую зависимость, а в случае выбросов твердых частиц, многочисленные расчеты (при прочих

^(*) Е.П. Майсюк, maysyuk@isem.irk.ru

равных условиях) показали, что на каждый процент роста калорийности топлива эмиссия снижается лишь на 0,15%.

Основной экологической проблемой котельных малой мощности в Сибирских и Дальневосточных регионах является выброс твердых частиц в атмосферу. Соответственно, для снижения образования твердых частиц при сжигании углей в существующих котельных наиболее эффективным является уменьшение зольности исходного топлива и улучшение процесса сжигания.

В последнее время, наибольший интерес проявляется к технологиям подготовки угля, путем извлечения из топлив вредных и загрязняющих компонентов. Термоподготовка угля обеспечивает практически полное удаление топливных соединений азота и серы, что позволяет существенно снизить или полностью устранить выбросы оксидов этих веществ в атмосферу. Проведенные в ИСЭМ СО РАН эксперименты показали, что при термической подготовке угля наблюдается рост не только калорийности (что незначительно способствует снижению выбросов), но и существенно увеличивается зольность (показано на примере мугунского угля), табл. 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик и расчетов выбросов для мугунского угля

Уголь	W _r , %	A ^d , %	S ^{daf} , %	Q ^{daf} , МДж/кг	Выброс, г/с
Мугунский уголь	21.6	5.6	0.6	16.6	4.14
Мугунский полукокс	1.4	17.2	0	20.7	4.58

Таким образом, для экологически чистого сжигания углей термоподготовка существенным образом позволит сократить выброс оксидов серы, что наиболее актуально для крупных энергетических объектов и может конкурировать с сероулавливающими установками. Проблему выбросов твердых частиц в котельных малой мощности термоподготовка не решит.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 17-48-380009.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.P. Maysyuk, A.N. Kozlov and I. Yu. Ivanova. Influence of Technical Characteristics of Solid Fuels at Estimation of Emissions from Small Boiler Plants.//Energy Systems Research, 2018. Vol 1 No 2. PP. 43-50

E.P. Maysyuk, A.N. Kozlov
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of
Sciences, Irkutsk, Russia

TECHNOLOGY OF THERMAL PREPARATION OF COAL FOR ECOLOGICALLY PURE COMBUSTION FUEL IN SMALL BOILERS

ИОНИЗАЦИЯ СМЕСИ ПРОПАН-БУТАНА С ВОЗДУХОМ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Известно, что в процессе горения углеводородных топлив возникает ионизация газов. Основными механизмами ионизации при равномерном горении являются термическая и химическая ионизация. При этом доля термической ионизации незначительна [1]. Исследования показали, что скорость распространения пламени, также, как и величина ионного тока увеличивается с ростом коэффициента избытка воздуха, максимумы этих величин наблюдаются при коэффициенте избытка воздуха, стремящегося к 1 [2]. При пульсационном режиме горения наблюдается ускорение всех тепломассообменных процессов [3]. Переход с равномерного горения смеси пропан-бутана и воздуха в открытом объеме в пульсационный режим характеризуется увеличением количества радикалов и, следовательно, ростом степени ионизации [4]. Соответственно, ионный ток имеет большие значения в неравновесных режимах горения, таких как турбулентный и пульсационный режимы. Но, в отличие от турбулентного режима, в пульсационном наблюдается пространственно-временное распределение ионов, за счёт влияния акустических колебаний на поток [5]. Данный эффект является малоисследованным, что определяет научную новизну работы.

Цель работы – определение напряжения при ионизации газов в режиме пульсационного горения и его пространственно-временное распределение в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Для решения поставленной цели была разработана экспериментальная установка пульсационного горения с вихревой камерой сгорания. Это вертикальная камера сгорания, состоящая из газоотводящей трубы и камеры, оснащённой регулирующим поршнем и четырьмя тангенциальными патрубками с соплами, через которые подаётся топливо. В качестве топлива используется смесь пропан-бутана. Хроматографический анализ состава показал, что топливо состоит из пропана (74,37%), метана (5,2%), изобутана (8,77%), бутана (6,9%), сероводорода (4,13%) и воды (0,63%). В разработанной установке были обнаружены колебания газа в частотном диапазоне 246–264 Гц и 738–789 Гц, что соответствует первой и третьей гармонике трубы, закрытой на входе и открытой на выходе, при оптимальном соотношении топливовоздушной смеси.

Был проведён эксперимент по измерению напряжения в пламени вихревой камеры пульсационного горения при оптимальном соотношении топливо-

^(*) А.О. Малахов, aleks19bass@yandex.ru

воздух. Использовался пассивный ионизационный зонд, представляющим собой вольфрамовый электрод в керамической изоляции. Измерительной частью зонда является участок вольфрамовой проволоки (длиной до 1 мм), находящийся вне керамической трубки. Сигнал с зонда снимался осциллографом Rigol DS2072A, на котором в режиме самописца фиксировались изменения напряжения по нескольким параметрам (максимальное и минимальное значения, амплитуда и среднее арифметическое) и записывались на usb-накопитель для дальнейшей обработки на компьютере с помощью программного обеспечения Origin и MS Excel. Наибольшее значения напряжения наблюдались в зоне максимальной температуры, напряжение пика составило 400 мВ, со смещением в сторону положительного заряда 200 мВ, отрицательного -200 мВ. Обнаружено, что колебания напряжения происходят с частотой акустических колебаний первой гармоники установки (около 250 Гц). Это свидетельствует о синхронизации пульсационных процессов горения и ионизации.

В итоге, разработанная установка соответствует требованиям для проведения экспериментов по изучению свойств ионизации в пульсационном режиме горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shah, P.V. Chemi-ionization and Nanoparticle Charging in Oxy-fuel Flames / Doctor of Philosophy / North Carolina State University, 2015.
2. Трофименко М.Ю. Электрическая структура факела газового смесового пламени / М.Ю. Трофименко., С.К Асланов, В.П Смоляр // Электронная обработка материалов. 2014. №1.
3. Ларионов В.М, Р.Г. Зарипов. Автоколебания газа в установках с горением // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2003. 227 с.
4. Sadikov. K.G. Development of the setup for study of the gas ionization in the pulsating mode of combustion. / K.G Sadikov. A.O Malahov, V.M Larionov, E.R. Saifullin, I.V Larionova // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1058 (1) № 012060
5. Larionov, V.M. Interaction of electric and acoustic vibrations in combustion / V.M Larionov, K.G Sadikov, G.A. Mitrofanov// Journal of Physics: Conference Series. 669 (1) № 012042

A.O. Malakhov, V.M. Larionov
Kazan (Volga region) Federal University

IONIZATION OF THE PROPANE-BUTANE MIXTURE WITH AIR IN THE VORTEX PULSATING COMBUSTION CHAMBER

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОСИФОНА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Термосифон - теплообменный аппарат в котором осуществляется перенос тепла благодаря фазовому переходу. Термосифоны находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Применение котла-утилизатора с термосифоном для теплоснабжения рассматривают авторы в работе [1]. Данный аппарат отличает простота, дешевизна конструкции, при его использовании происходит снижение потребления электричества. Вопросы утилизации вторичных ресурсов на компрессорных станциях магистрального газопровода описано в [2]. По данным автора, основной потерей тепла в газотурбинной установке при перекачивании газа является теплота уходящих газов, которую предлагается полезно использовать с помощью трубной доски, состоящей из термосифонов. Их применение для стабилизации температурного поля в основании насыпи железной дороги рассмотрено в [3].

Для оценки целесообразности применения термосифонов для целей работы [2] были проведены испытания, в которых варьировали вид теплоносителя (вода, 30%-ный водный раствор хлористого кальция, Фреон-113, 40%-ный водный раствор антифриза). Автор пришел к выводу, что наибольшей теплопередающей способностью обладает термосифон при заполнении его внутренней полости водой.

Исследованием зависимости степени заполнения термосифонов рабочим веществом от рабочих параметров изучалось в работе [4]. Наиболее оптимальный режим работы получается при заполнении трубки на 30% от всего объема. В качестве рабочего тела был использован фреон R141b.

Известны и другие исследования [5], [6], к примеру, по поиску температуры начала кипения теплоносителя внутри термосифона.

Работа посвящена анализу и сравнению результатов, полученных практическим путем с результатами расчета, определению оптимального количества рабочего теплоносителя.

Экспериментальная установка представляет из себя теплообменный аппарат (термосифон, заправленный фреоном R410A) (1), расположенный внутри корпуса (2). Корпус изготовлен из двух прямоугольных воздухопроводов, испарительная часть имеет размер 200x100, конденсаторная часть имеет размер 300x100. Воздуховоды изготовлены из оцинкованной стали толщиной 0,55 мм.

^(*) Ф.Г. Мамедов, www.famin19@yandex.ru

Корпус установки теплоизолирован в два слоя теплоизоляцией «Пенофол С10», толщина изоляции составляет 10 мм. Вентилятор (3) в конденсаторной части теплообменного аппарата, охлаждает термосифон. Вентилятор нагнетает воздух с температурой равной температуре в помещении. Регулирование расхода воздуха осуществляется путем открытия и закрытия диффузора, установленного на всасе. Канальный вентилятор марки «РОВЕН», модель VCZpl-125. Тепловентилятор (4), осуществляет нагрев воздуха с температурой 28 °С до температуры 110 °С. К тепловентилятору подсоединяется гофрированный воздуховод диаметром 250 мм. Гофрированный воздуховод подсоединяется с помощью перехода 250 мм на 125 мм длина перехода составляет 300 мм, к круглому воздуховоду из оцинкованной стали диаметром 125 мм. Круглый воздуховод врезкой подсоединяется к испарительной части установки. Характеристики тепловентилятора: электрическая мощность 2 кВт, расход воздуха составляет 73м³/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савченкова Н. М., Кравцов Д. А. Применение котла-утилизатора с термосифоном для теплоснабжения // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3-х томах. 2016. Издательский дом МЭИ, 2016. Т. 2. С. 303.
2. Юсупов С.Т. К применению теплообменников на базе двухфазных термосифонов для утилизации вторичных энергоресурсов на компрессорных станциях магистрального газопровода // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. УГНТУ, 2006. №66. С. 312-317.
3. Чжан А.А., Шестернев Д.М., Чжан Т.Р. Мероприятия по стабилизации температурного поля в основании насыпи амуро-якутской железной дороги // Вестник северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: науки о земле. СВФУ имени М.К. Аммосова, 2017. №3. С. 43-53.
4. Ушаков К.Ю, Петерс А.Н., Зайцев А.П., Жданов А.В., Богомоллов А.Р. Исследование зависимости температуры поверхности зоны конденсации от степени заполнения термосифонов рабочим веществом и температуры греющей среды // Сборник материалов IX всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая". СВФУ имени М.К. Аммосова, 2017.

F.G. Mamedov, N.M. Savchenkova
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

EXPERIMENTAL STUDY OF THE USE OF THERMOSIFON IN VENTILATION AND AIR CONDITIONING SYSTEMS

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАГРЕВАТЕЛЬ-ВЕНТИЛЯТОР В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Целью данной работы являлось экспериментальное изучение переходных режимов работы системы нагреватель-вентилятор в переменных режимах работы: (1) при скачкообразном изменении производительности нагревателя и постоянной производительности вентилятора и (2) при скачкообразном изменении производительности вентилятора, но фиксированной производительности воздухонагревателя. Экспериментальный стенд систематически описан в [1]. В качестве параметра подобия использовалась относительная избыточная теплота

$$Q^r = \frac{Q(\tau) - Q(0)}{|Q(\tau_*) - Q(0)|}$$

где: $Q(\tau)$, $Q(0)$, $Q(\tau_*)$ – поглощаемая/выделяемая теплота потоком, проходящим через элемент системы «воздухонагреватель-вентилятор-помещение» в текущий τ , начальный $\tau = 0$, и конечный τ^* моменты времени.

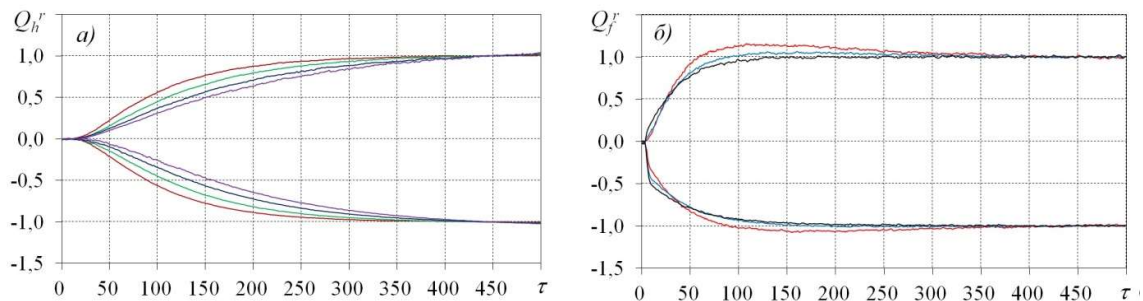


Рис. 1. Эволюции Q_h^r и Q_f^r от времени: а) при разогреве и охлаждении потока для различных постоянных режимов работы вентилятора; б) при разгоне и замедлении потока для различных постоянных режимов работы воздухонагревателя

Анализ показал, что фактически все данные являются подобными. В качестве примера на рис. 1а представлена эволюция относительной избыточной

(*) Р.Ш. Мансуров, rmansurov@inbox.ru

теплоты нагревателя Q_h^r при фиксированной величине скачка его производительности, но при разных режимах работы вентилятора. Напротив, на рис. 1б показаны данные эволюции относительной избыточной теплоты вентилятора Q_f^r при фиксированном скачке его производительности и при разных вариациях теплопроизводительности воздухонагревателя. Здесь верхние (над осью времени) и нижние кривые соответствуют максимальному и минимальному значению производительности работы элемента системы.

Показано, что при разгоне потока (скачке производительности вентилятора) имеет место сначала резкое изменение Q_f^r до некоторого максимального значения при тепловыделениях воздухонагревателя значительно превышающих тепловыделения у вентилятора, а затем – ее монотонное почти экспоненциальное снижение до выхода на стационарное значение. Тогда как при его разогреве потока (скачке производительности нагревателя) почти всегда реализуется монотонный рост Q_h^r , вплоть до выхода на стационарное значение.

Таким образом, функциональная и параметрическая идентификация эволюций элементов климатической системы дает возможность определять текущие параметры состояния потока в процессе переходного процесса при известных начальных значениях. Зная функциональную зависимость эволюции Q^r от времени, температуры и скорости, появляется возможность решить прямую задачу, т.е. спрогнозировать реакцию потока на возмущение, как для отдельных элементов климатической системы, так и для помещения. Поскольку реакция на возможное изменение производительности рассмотренных элементов климатической системы (нагревателя и вентилятора) практически на всем временном участке оказывается предсказуемой, то появляется реальный инструмент регулирования и управления микроклиматом в помещении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мансуров Р.Ш., Рудяк В.Я. Экспериментальное изучение переходных процессов в системе нагреватель–вентилятор–помещение // Известия вузов. Строительство. 2018. №10. С.37-50.

R.Sh. Mansurov¹, V.Ja. Rudjak^{1,2}

¹Novosibirsk State University of Architectural and Civil Engineering (Sibstrin),

²Novosibirsk State University

EXPERIMENTAL STUDY OF FUNCTIONING HEATER-FAN SYSTEM IN VARIABLE OPERATING MODES

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
НА ОСНОВЕ ЦИКЛОВ ОТТО И РЕНКИНА**

Децентрализация является одним из путей развития энергетики России. К децентрализованным или распределенным системам принято относить не только автономные, но и независимые в техническом и хозяйственном плане установки.

К децентрализованным или распределенным энергетическим установкам принято относить энергоблоки малой мощности. В России наиболее широкое применение в качестве распределенных генерирующих мощностей получили энергоблоки на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и, в частности, их разновидность – газопоршневые энергетические установки (ГПУ) [1]. Особенность последних в том, что в качестве топлива используется газ. ДВС или ГПУ являются тепловыми двигателями, в основе работы которых лежит термодинамический цикл Отто, а рабочим телом являются продукты сгорания топлива.

Наиболее часто повышение эффективности использования топлива для установок, работающих по циклу Отто, достигается за счет когенерации [2], то есть отпуска потребителю электроэнергии и теплоты за счет утилизации низкопотенциального тепла контура охлаждения ДВС и дымовых газов. Возможен также отпуск холода, тогда установку называют тригенерационной [3].

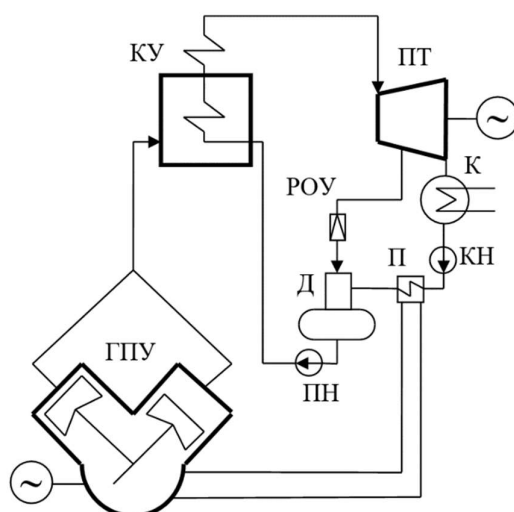


Рис. 1. Тепловая схема (б) энергетической установки на базе ДВС и паровой турбины

^(*) Н.В. Марасанов, nikmarasanov@gmail.com

Наряду с этим существует возможность повышения эффективности установок при генерации только электроэнергии, что можно обеспечить при комбинировании цикла Отто и цикла Ренкина в одном технологическом процессе. Тепловая схема (рис. 1) такой комбинированной мини-ТЭС представляет собой последовательно включенные агрегаты основного теплосилового оборудования в виде газопоршневой установки (ГПУ), котла-утилизатора (КУ) и паровой турбины (ПТ) с обратными связями, обеспечиваемыми также последовательно включенными конденсатором (К), подогревателем (П) и деаэратором (Д) с конденсатным (КН) и питательным (ПН) насосами.

Задачей настоящей оптимизации является создание методики подбора таких параметров паросилового контура, которые одновременно обеспечили бы максимально возможное повышение электрического КПД комбинированной мини-ТЭС при снижении её удельной стоимости. Данная задача является комплексной, поскольку включает в себя целый ряд таких зависимостей, как:

$$t_0 = f(t_{yx});$$
$$F_{КУ} = f(t_{yx});$$
$$t_{ПВ} = f(t_K) \text{ и др.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Черемных Д.Н., Ташлыкова Е.В., Разепина М.Г. Газопоршневые установки как альтернативный способ генерации электроэнергии / Молодой ученый. – 2014. – №21. – С.245-247.
2. Григорьев С.А., Григорьев А.С., Кулешов Н.В. и др. Энергоустановка с когенерацией электрической и тепла и электрохимических водородных систем / Теплоэнергетика. – 2015. – №2. – С.3-9.
3. Шадек Е.Г. Тригенерация как технология экономии энергоресурсов / Энергосбережение. – 2015. – №2. – С.52-57.

N.V. Marasanov
Novosibirsk State Technical University

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF POWER PLANT BASED ON OTTO AND RANKINE CYCLES

А.Ю. Маркелов^{1, 2, (*)}, А.А. Кудринский^{3, 4},
С.В. Анпилов³, В.Л. Ширяевский²
¹НИУ «МЭИ»,
²ООО «ФИНПРОМАТОМ»,
³МГУ им. Ломоносова,
⁴НИЦ «Курчатовский институт»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ В ШЛАКОВОМ РАСПЛАВЕ

Одной из ключевых нерешённых экологических проблем Российской Федерации (РФ) остаётся накопление твёрдых коммунальных отходов вблизи водоёмов и населённых пунктов.

К таким отходам относится и осадок сточных вод, имеющий достаточно высокую калорийность. В настоящее время осадок в РФ преимущественно депонируется. В зарубежных странах наиболее распространённая технология его утилизации – сжигание. Недостатки этой технологии: риск эмиссии супертоксиантов, образование токсичной золы, требующей захоронения и специального обращения, отсутствие отечественных производителей оборудования, привязанность к зарубежным поставщикам.

Авторами предложена технология остеклования органических отходов применительно к осадку сточных вод, исключая риски эмиссии супертоксиантов за счёт повышенной температуры сжигания (1400-1600 °С) [1]. Продуктом переработки является остеклованный гранулированный шлак, инкапсулирующий тяжёлые металлы и пригодный для использования в строительстве.

Оборудование для остеклования включает блок сушки осадка с исходной влажностью около 80% путём косвенного нагрева паром (или маслом) с рекуперацией теплоты дымовых газов, пеллетизацию высушенного осадка с влажностью 10-15% и высокотемпературное окисление полученных пеллет в плавителе на поверхности шлакового расплава в избытке кислорода (воздуха) при температуре 1400-1600 °С, при этом минеральная компонента осадка плавится, а органическая окисляется с выделением энергии. Отходящий газ направляется в систему очистки.

Плавитель состоит из следующих основных конструктивных элементов: внешние ограждающие конструкции, выполненные из бадделеитокорундовых, шамотных и динасовых огнеупорных материалов, шнекового устройства подачи

(*) А.Ю. Маркелов, alex.markeloff@gmail.com

пеллет, горелочных устройств и подачи воздуха дополнительного дутья, трубы отвода газов.

Работа посвящена CFD-моделированию физических и химических процессов, сопровождающих высокотемпературное окисление пеллет осадка на поверхности шлакового расплава в специально созданной для апробации технологии на реальном сырье опытной установке с производительностью плавителя до 100 кг/ч пеллет с влажностью 10-15%.

Создана математическая модель плавителя и проведены численные расчеты течения высокотемпературной газовой среды, подаваемой горелочными устройствами, в рабочем объеме печи с учётом теплофизических и химических процессов, протекающих в насыпи подаваемого твёрдого сырья в форме пеллет (осадка) в стационарном приближении.

Подаваемое сырьё в модельном приближении состоит из углерода, твёрдых минеральных включений и влаги. В процессе работы плавителя происходит нагрев сырья с последующим испарением содержащейся влаги, окислением углеродной компоненты сырья и плавлением минеральной составляющей. Задача решалась в стационарном приближении: моделировалась динамика движения газовой среды, непрерывная подача сырья описывалась соответствующими источниками тепла и массовыми источниками компонент газа, распределёнными в насыпи сырья, образующейся под окном загрузки. Распространение тепла в твёрдых телах (стенках печи) описывалось уравнением теплопроводности.

В работе приводится сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Результаты могут быть использованы при проектировании плавителя полномасштабной установки производительностью более 5 т/ч пеллет высушенного осадка влажностью 10-15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. НДТ ИТС 10-2015 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», М.: Бюро НДТ, 2015. 377 с.

A.Yu. Markelov^{1,2}, A.A. Kudrinsky^{3,4},
S.V. Anpilov³, V.L. Shiryayevsky²

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

²LLC «FINPROMATOM»,

³Lomonosov Moscow State University,

⁴National Research Center «Kurchatov Institute»

PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES SIMULATION OF ORGANIC WASTES PROCESSING BY THE METHOD OF HIGH-TEMPERATURE OXIDATION IN THE MELTED SLAG

О.В. Марченко, С.В. Соломин,
А.Н. Козлов^(*), В.А. Шаманский
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В РОССИИ

В России образуются значительные объемы отходов лесозаготовки и лесопереработки. Они могут быть использованы для производства энергии. В настоящей работе рассматривается автономная система электроснабжения, включающая газогенераторную электростанцию (ГГЭС) на древесном топливе, дизельную электростанцию (ДЭС), одну или несколько ветроэнергетических установок (ВЭУ) и потребителей электроэнергии с их графиком нагрузки. Математическая постановка задачи оптимизации структуры и режимов работы системы электроснабжения сводится к минимизации целевой функции (суммарных дисконтированных затрат на создание и эксплуатацию системы или стоимости производимой электроэнергии) с рядом с рядом дополнительных условий – выполнение балансов мощности, первичной, вторичной и конечной энергии. Проведено моделирование системы электроснабжения при разных значениях цены дизельного и древесного топлив, средней многолетней скорости ветра и технико-экономических показателей энергоустановок. По результатам расчетов определены зоны эффективности энергетических технологий и стоимость производимой электроэнергии. Показано, что газогенераторные электростанции с емкостями для хранения газа существенно экономичнее дизельных электростанций и могут вытеснять их при сложившихся в России ценах на дизельное топливо. В районах с высокими среднегодовыми скоростями ветра эффективно совместное использование газогенераторных электростанций и ветроэнергетических установок.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН в рамках научного проекта Ш.17.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0, а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-29-24047 мк, на оборудовании, входящем в ЦКП «Высокотемпературный контур».

^(*) А.Н. Козлов, kozlov@isem.irk.ru

O.V. Marchenko, S.V. Solomin,
A.N. Kozlov, V.A. Shamansky
Melentiev Energy Systems Institute
of Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Irkutsk, Russia

**USE OF GASIFIER-BASED ELECTRIC POWER STATIONS FOR
IMPROVING THE ECONOMY OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY
SYSTEMS IN RUSSIA**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОДНОРЯДНЫХ ПУЧКОВ
ТРУБ С ЛЕНТОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ
ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ**

Исследования свободной конвекции ведет к расширению понимания механизмов и возможностей использования свободно-конвективных течений в энергетических процессах. Его явления достаточно сложные, могут наблюдаться процессы сопряженного теплообмена, например излучения и конвекции. Теоретические методы описания и расчета используются для тел простой формы: шар, пластина, цилиндр. Методы теоретического анализа для теплообмена тел сложной формы слишком объемны и громоздки [1-3].

Интенсифицирование свободно-конвективного теплообмена возможно за счет использования различного типа оребрения. Для расчета естественно-конвективной теплоотдачи оребренных поверхностей в основном применять критериальные зависимости эмпирического характера.

Схема экспериментальной установки для проведения исследований теплоотдачи при естественной конвекции воздуха в пучках труб с ленточным оребрением, конструкция ребристой трубы-калориметра, порядок проведения опытов и методика обработки данных приведены в [4].

В проводимых опытах использовались промышленные биметаллические оребренные трубы со спиральными навитыми ребрами, изготовленные ЗАО «Октябрьскиммаш» и применяемые в аппаратах воздушного охлаждения, калориферах и других теплообменниках. Диаметр несущей трубы $d_n = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм, геометрические параметры оребрения: наружный диаметр ребра $d = 48$ мм; диаметр у основания ребра $d_0 = d - 2h = 25,8$ мм; высота ребра $h = 11,1$ мм; шаг ребра $s = 3,125$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,35$ мм; коэффициент оребрения $\text{трубы} \varphi = 11,2$.

Полная длина биметаллической трубы, включая торцевые участки, равна 440 мм, теплоотдающая длина оребренной части $l = 400$ мм. В ряду устанавливались пять обогреваемых труб, в центре – калориметр. Все трубы в опытных пучках были изготовлены из одной партии оребренных труб и имели идентичную конструкцию.

Положение труб в пучке характеризуется поперечными шагами $S_1 = 58; 61; 64; 70; 76; 86; 100$ мм, которым соответствовали относительные шаги $\sigma_1 = S_1 / d = 1,208; 1,271; 1,333; 1,458; 1,583; 1,792; 2,083$. Экспериментальные данные для каждой серии опытов по конвективной теплоотдаче с погрешностью не

^(*) А.В. Новожилова, a.novozhilova@narfu.ru

более $\pm 5\%$ аппроксимируются уравнением вида: $Nu = A \cdot Ra^n$. Результаты опытов представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, безразмерный коэффициент теплоотдачи находится в пределах $Nu = 1,26 \dots 4,36$ при изменении числа Рэлея $Ra = (0,47 \dots 3,5) \cdot 10^5$.

При сопоставлении теплоотдачи однорядных горизонтальных пучков с разными шагами (рис. 1) можно отметить, что она плавно снижается при увеличении шага разбивки. Например, у пучка с шагом 58 мм теплоотдача выше на 31% по сравнению с пучком 100 мм. Это объясняется с тем, что в тесных пучках происходит больший прогрев воздуха, связанный с особенностями гидродинамического обтекания.

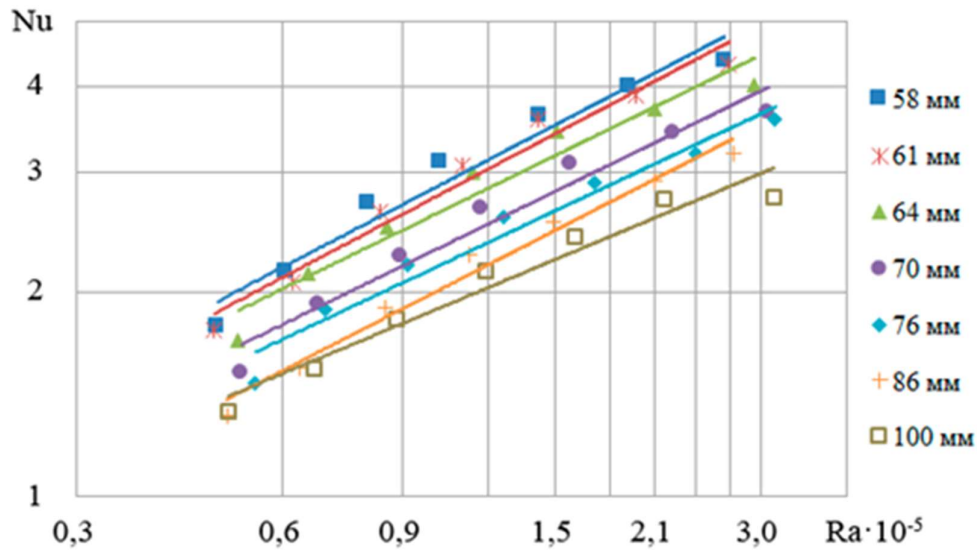


Рис. 1. Теплоотдача однорядных горизонтальных пучков

ЛИТЕРАТУРА

1. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р.Л., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х кн.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 528 с.
2. Гусев С.Е., Шкловер Г.Г. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 160 с.
3. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 400 с.
4. Позднякова А.В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушительных камер: автореф. дис. на соискан. учен.степ. канд. техн. наук. – Архангельск: АГТУ, 2003. – 24с.

Z.G. Marina, A.V. Novozhilova, E.A. Lvov, A.Yu. Vereshchagin
Northern (Arctic) federal university named after M.V. Lomonosov,

RESEARCH OF HORIZONTAL SINGLE-ROW BUNDLES OF RIBBON FINNED TUBES WITH AT FREE CONVECTION

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СЛОЕМ ПРОНИЦАЕМОГО МАТЕРИАЛА**

Предметом настоящего исследования является взаимодействие ударной волны со слоем сыпучего (гранулированного) материала в двух постановках: с неразрушаемым и разрушаемым каркасом. Для обоих вариантов получены и проанализированы волновые структуры, которые возникают как перед пористым слоем гранулированных частиц, так и в зазоре между слоем и торцевой стенкой ударной трубы.

В работах [1,2] в пористом слое изучаются изменение давления как отдельно газа, так и давление в смеси газ - частицы. Показано, что амплитуда давления проходящей волны зависит от ряда параметров, передающих различные свойства пористого слоя: протяженность, диаметр и форма элементов, теплофизические характеристики материала (плотность, теплоемкость и т.п.), возможность уплотнения элементов структуры.

Эксперименты проводились в атмосферной ударной трубе (рис. 1) диаметром 55 мм, расположенной горизонтально. Для контроля однородности рассматриваемых процессов в окружном направлении датчики №1 и №2 были расположены в одном и том же сечении трубы.

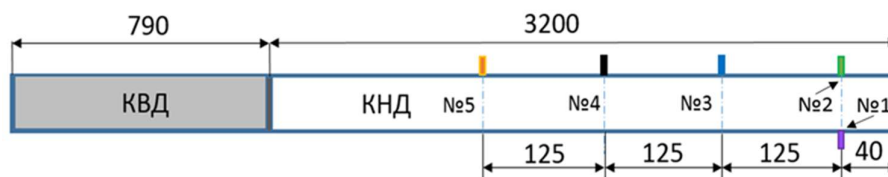


Рис. 1. Схема экспериментальной ударной трубы

Для создания пористого слоя использовались частицы полиуретана правильной сферической формы. Плотность материала 1200 кг/м³. Размер частиц не был унифицирован и лежал в диапазоне от 2 до 3 мм. Толщина гранулированного слоя составляла 30 мм. Для рассматриваемой серии экспериментов в ударной трубе гранулированный слой располагался между датчиками №3 и №4. Число Маха ударной волны имело значение равное 1,7.

Для расположения и удержания пористого слоя в установке были разработаны удерживающие устройства различного типа. Влияние данных устройств на волновую структуру течения не превышает 15%. Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Под аналитическим решением понимается

^(*) А.В. Масюкевич, 79313165906@yandex.ru

значения давления в падающей и отраженной ударной волне для ситуации без слоя пористого материала.

Для случая неподвижного пористого слоя, рост давления в полости между торцом ударной трубы и пористым слоем имеет ступенчатый характер нарастания, связанный с многократным отражением прошедшей ударной волны (датчик 4). В случае подвижного гранулированного слоя темп изменения давления в полости увеличивается в два раза. Связано это с двумя причинами. Во-первых, за счет увеличения проницаемости гранулированного слоя большее количество газа поступает в полость. Во-вторых, сам размер полости уменьшается из-за смещения облака частиц в направлении торца трубы. Эти же причины, приводящие к формированию волны разрежения, объясняют различие в поведении давления перед пористым слоем (датчик 3).

Работа выполнялась в рамках проекта 3.3314.2017/4.6 государственного задания Министерства образования и науки РФ на период 2017–2019 гг.

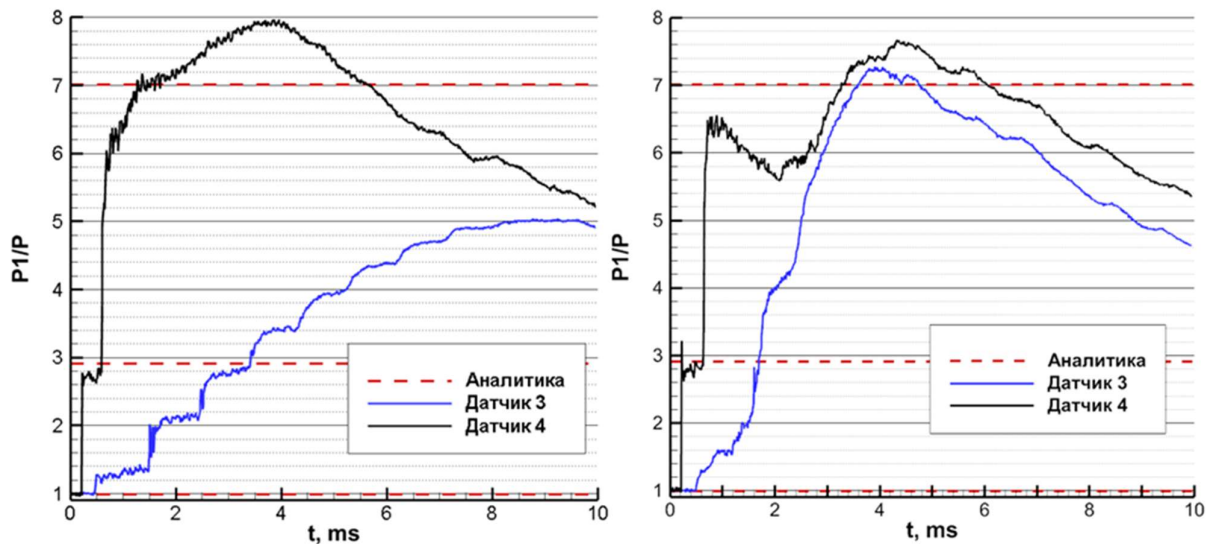


Рис. 2. График зависимости давления от времени для датчиков №3 и №4 для варианта с неразрушаемым (слева) и разрушаемым (справа) гранулированным слоем

ЛИТЕРАТУРА

1. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers // Vol. 22, 1997, pp.432-443
2. X. Rogue, G. Rodriguez, J. Haas, R. Saurel. Experimental and numerical investigation of the shock-induced fluidization of a particles bed Shock Waves, 8 (1998), pp. 29-45.

A.V. Masyukevich, S.V. Bulovich
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERACTION OF A SHOCK WAVE WITH A LAYER OF PERMEABLE MATERIAL

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАБОТЫ

Актуальность темы к возобновляемым энергетическим ресурсам, а именно к ветроэнергетике обусловлена истощением запасов углеводородных природных ископаемых, отсутствием их в отдельных странах мира и как следствие высокой стоимостью электрической энергией.

Потенциал ветроэнергетики позволяет решить проблему отдаленных территорий в которых отсутствует центральное энергоснабжение, а также комбинировать с центральным энергоснабжением в качестве использования ветроэнергетической установки, например в качестве освещения центральных автомагистралей, деревень, поселений и т.д. С точки зрения экологического аспекта ветроэнергетические установки являются экологически безопасными и решают проблему экологии, однако есть свои особенности их размещения с связи с шумовыми характеристиками.

Для исследования зависимостей ветроэнергетической установки при различных параметрах ветра разработана лабораторная установка, установленная в лаборатории кафедры ТГВ ФГБОУ ВО «НИ МГСУ». Данная лабораторная модель ветроэнергетической установки предназначена для имитации режимов реальной ее работы. Общий вид и схема лабораторной установки приведен на рис. 1.

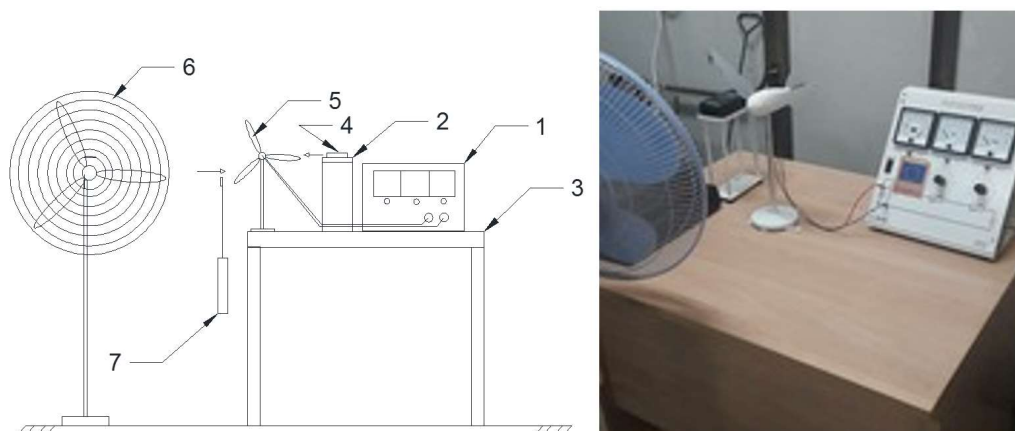


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – блок нагрузки и измерения; 2 – подставка для фототахометра; 3 – лабораторный стол; 4 – фототахометр; 5 – ветрогенератор; 6 – напольный вентилятор; 7 – анемометр.

^(*) А.А. Мелехин, melehin2006@yandex.ru

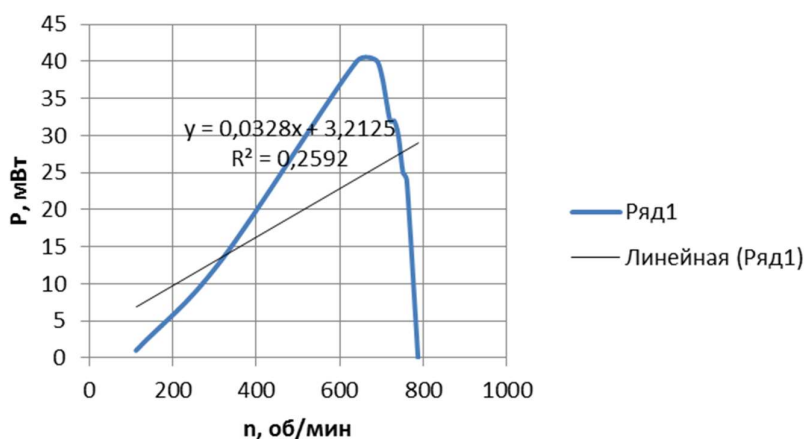


Рис. 2. Зависимость мощности развиваемого турбиной от частоты вращения ветрогенератора.

В частном случае проведено исследование зависимости мощности синхронного генератора от частоты вращения $P = f(n)$ и $M = f(n)$ при постоянной скорости ветра. С помощью регуляторов сопротивления нагрузки нагрузочных резисторов блока нагрузки и их изменения при постоянной скорости ветра определены сила тока, напряжение, мощность развиваемая ветроэнергетической установкой. На рис. 2 показана зависимость мощности развиваемого турбиной от частоты вращения ветрогенератора. Полученные данные обработаны и описываются следующим уравнением касательной:

$$y = 0,0328x + 3,2125, R^2=0,2592 \quad (1)$$

Выводы: Анализ данного графика показывает, что после определенной частоты вращения генератора ветроэнергетической установки вырабатываемая мощность падает, что обусловлено особенностью конструкции лопастей. Данная особенность нужно учитывать для всех имеющихся типов ветроэнергетических установок [1]. Установлены эмпирические зависимости влияния скорости ветра на энергетические характеристики ветрогенератора.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 51237–98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения.

А.А. Melekhin
National Research
Moscow State University of Civil Engineering

A STUDY OF THE OPERATION OF WIND TURBINES IN THE SIMULATION DIFFERENT PARAMETERS OF ITS WORK

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ ГОРОДСКИХ МИКРОРАЙОНОВ ВЕТРОВЫМИ ПОТОКАМИ

Учет ветрового воздействия на территории жилой застройки необходим для регулирования температурно-влажностного режима, так как ветер способствует переносу воздушных масс, выравнивает температурные различия между отдельными районами города, оказывает существенное влияние на состояние загрязненности воздушного бассейна. Анализ градостроительной практики, выявил случаи недостаточного использования возможностей регулирования ветрового режима архитектурно-планировочными средствами, а кое-где несоответствие планировки и застройки природно-климатическим условиям, усугубившее дискомфорт аэрационного режима местности.

Объясняется тем, что в действующих нормативных документах указания по учету ветрового режима касаются лишь случаев выбора места расположения селитебных и промышленных территорий относительно преобладающих ветров. Специальные указания, связанные с учетом и регулированием ветрового режима, в действующих строительных нормах отсутствуют. Стоит отметить, что современные технологии математического моделирования позволяют рассматривать данные вопросы с высокой степенью достоверности и более корректно разрабатывать проектные решения по застройке территорий и комплексному благоустройству для компенсации биоклиматического дискомфорта населения.

Целью настоящей работы является исследование обтекания микрорайонов г. Красноярск (Тихие Зори и Белые Росы) ветровыми потоками. Для моделирования используется программный комплекс SigmaFlow – это некоммерческий универсальный CFD программный комплекс, который более 15 лет развивается совместно Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе и Сибирским Федеральным университетом [1,2].

Проанализировав результаты, можно сделать вывод, что при обтекании микрорайона Тихие зори первый ряд зданий представляет собой практически единое слабопроницаемое потоком препятствие, за которым формируются застойные зоны (рис. 1а). Что касается микрорайона Белые Россы, то при заданном направлении ветра застройка проявляет себя как легко проницаемая пористая среда; образуются вдоль зданий застойные зоны, а за застройкой ближе к р. Енисей наблюдается повышение скоростей (рис. 1б).

(*) В.Д. Мешкова, Redel-VD@yandex.ru

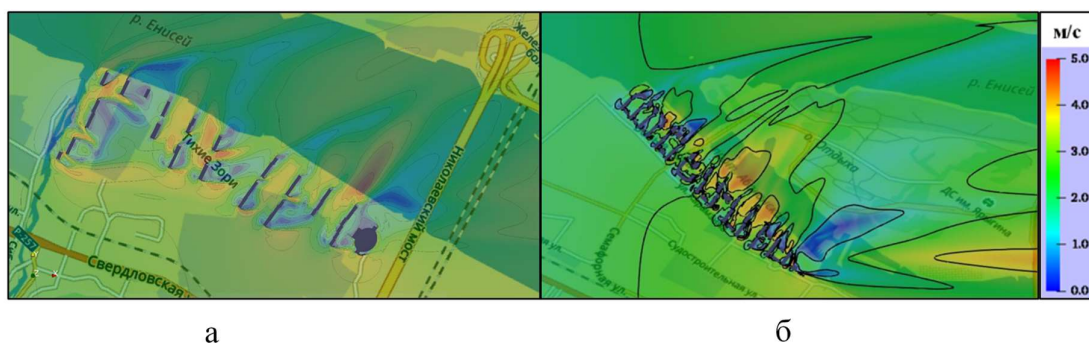


Рис. 1. Поле скорости в горизонтальном сечении на высоте 2 м
(а. Тихие Зори; б. Белые Росы)

Кроме этого, на территории всех рассмотренных микрорайонов величина скорости ветра на уровне максимального человеческого роста (2 метра) не превышает условия дискомфортных ощущений, а именно 5-7 м/с.

Таким образом, применение математического моделирования микрорайонов позволяет выявлять застойные зоны и зоны дискомфорта для жителей и соответственно принимать обоснованные решения по управлению процессами аэрации жилой застройки.

Работа выполнена при финансовой поддержке: «Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта №18-41-242006: «Разработка математической модели, анализ и прогнозирование динамики распространения загрязняющих газовых и дисперсных примесей в атмосфере г. Красноярска»

ЛИТЕРАТУРА

1. Дектерев А.А. и др. Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов // Вычислительные технологии. 2003. Vol. 8, № 1. С. 250-255.
2. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач // Сборник статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2010. Vol. 4, № 2. С. 117–122.

V.D. Meshkova², A.A. Dekterev^{1,2}, S.A. Filimonov^{1,2}
¹Institute of Thermophysics SB RAS,
²Siberian Federal University

RESEARCHES OF WIND FLOW REGIMES IN CITY MICRODISTRICTS

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПЛОТНОСТИ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ He – N₂ – Ne ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭТОЙ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ

На кафедре Теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» была создана экспериментальная установка по исследованию плотности бинарных газовых смесей при низких установках [1-2]. В установке реализован метод пьезометра постоянного объема, количество вещества в пьезометре определялось волюметрическим методом. На данной установке были получены экспериментальные удельные объемы для газовой системы He – N₂ в диапазоне температур 100 ÷ 300 К и при давлении до 16 МПа. Затем установка была модернизирована для работы с тернарными смесями [3]. Для этого была добавлена третья линия подачи чистого компонента в смеситель. В остальном ни установка, ни методика проведения эксперимента не изменились. В указанном диапазоне параметров было произведено экспериментальное определение плотности газовых смесей для трех концентраций ($x_{\text{He}}=0,24$; $x_{\text{N}_2}=0,17$), ($x_{\text{He}}=0,33$; $x_{\text{N}_2}=0,34$), ($x_{\text{He}}=0,16$; $x_{\text{N}_2}=0,60$).

Переход от одного состояния в пьезометре к другому производилось перепуском из него части вещества в газометр. Если состояние вещества в пьезометре находится близко к двухфазному состоянию, возникает угроза расслоения смеси во время перепуска. Для выяснения этого обстоятельства была разработана методика определения концентрации небольшого количества бинарной газовой смеси. Эта методика основывалась на перепуске вещества в тонкостенный титановый баллончик с последующим определением концентрации газовой смеси весовым методом. Исследованию были подвергнуты смесительный сосуд смесителя и пьезометр. Баллончик термостатировался в термостате смесителя. Давление и температура газа в нем измерялись. Затем масса баллончика определялась с помощью аналитических весов типа ВЛА-200г-М. Были проведены тарировочные опыты для получения следующих параметров баллончика: внутренний объем вакуумированного баллончика; зависимость внутреннего объема от температуры, давления; найден внешний объем. Взвешивание производилось методом Менделеева Д.И. Зная температуру, давление газовой смеси, массы и объема смеси, с помощью уравнения состояния газовой смеси $p = F(p, T, x)$ можно найти концентрацию компонентов. При взвешивании учитывались поправки на Архимедову силу, термическая и барическая поправки объема баллончика. Правильность

^(*) В.А. Милютин, mva.z@yandex.ru

определения концентрации, измеренной в смесителе, проверялась на восьми выпусках в баллончик. Исследования проводились на бинарной системе He – N₂. Расхождение величин, полученное двумя независимыми методиками, составила не более $2,0 \cdot 10^{-4}$ мольных долей He. А три выпуска вещества из пьезометра показало незначительное обеднение гелием газа в пьезометре. Температура пьезометра при этом составляла 125К. Тем самым, была доказана надежность использованной экспериментальной методики.

Попытка взаимной проверки экспериментальных данных тройных смесей и REFPROP 9.0 [6] не увенчалась успехом, поскольку REFPROP 9.0 не работает с данной тройной системой. Погрешность экспериментальной плотности оценена авторами для бинарной системы в 0,2%, для тройной – в 0,3%.

Полученные данные, а также экспериментальные данные других авторов [4-5] были использованы для получения уравнения состояния в вириальной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев В.Н., Прусаков П.Г., Барковский В.В., Милютин В.А. Экспериментальная установка для исследования плотности смеси гелий - азот при температуре 80 – 300К и давлениях до 20 МПа. Тр. Моск. энерг. ин-та. 1984. Вып. 622. С.94 – 101.
2. Milyutin V.A. Experimental study of the density of the helium-nitrogen gas system at low temperatures. «Journal of Physics: Conference Series», 2017, - 6 p.
3. An experimental study of the density of the helium – neon – nitrogen gas system at low temperatures. Принята к печати в «Journal of Physics: Conference Series».
4. F. B. Canfield, T. W. Leland, Riki Kobayashi. Compressibility Factors for Helium-Nitrogen Mixtures. J. Chem. Eng. Data, 1965, 10 (2), pp 92–96.
5. J. E. Miller, Lowell Stroud, L. W. Brandt. Compressibility of Helium-Nitrogen Mixtures. J. Chem. Eng. Data, 1960, 5 (1), pp 6–9.
6. REFPROP 9.0: Reference Fluid Thermodynamic and Transport properties: Copyright 2010 by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the USA.

M.V. Milyutin
FSBEI HE «NRU «MPEI»

EXPERIMENTAL DATA ON THE DENSITY OF THE GAS SYSTEM He – N₂ - Ne AT LOW TEMPERATURES: EQUATION OF STATE OF THIS GAS SYSTEM

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТРУБНОГО ПУЧКА

Процесс конденсации пара из паровоздушной смеси, движущейся через трубный пучок, состоящий из гладких горизонтальных труб, довольно часто встречается в теплообменных аппаратах различного назначения. В общем случае процессы тепломассопереноса в таких системах определяются влиянием множества факторов: условиями охлаждения трубок внутри трубного пучка, включая неоднородность условий охлаждения; гидродинамикой потока, определяемой конструкцией аппарата; ориентацией вектора скорости паровоздушной смеси относительно вектора ускорения свободного падения; орошением нижних трубок пучка конденсатом, образовавшимся на верхних трубках; возможный унос конденсата с поверхности пленки и т.д. [1,2]. В предыдущих работах авторов [3,4] была разработана математическая модель пленочной конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси на трубном пучке из гладких горизонтальных труб. Для описания внешнего потока в модели используются уравнения однофазной гидродинамики, процесс конденсации моделируется на уровне граничных условий на поверхности трубок с учетом движущейся ламинарной пленки конденсата. Данная модель была дополнена упрощенной моделью для учета орошения нижних трубок пучка конденсатом, образовавшимся на верхних трубках. На рис. 1 представлены результаты верификации модели на экспериментальных данных [5] о конденсации на внешней поверхности горизонтальных гладких труб, расположенных в пучке шахматной компоновки при давлении паровоздушной смеси 30 кПа, скорости горизонтально направленного вынужденного течения перед фронтом трубного пучка от 1.3 до 4 м/с и объемной доли воздуха от 0 до 12%. Рассогласование рассчитанных значений коэффициента теплоотдачи с опытными данными не превышает 20% для всех рассмотренных режимов.

Расчеты выполнены с использованием развиваемого авторами CFD кода ANES [6]. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01604).

* К.Б. Минко, minkokb@gmail.com

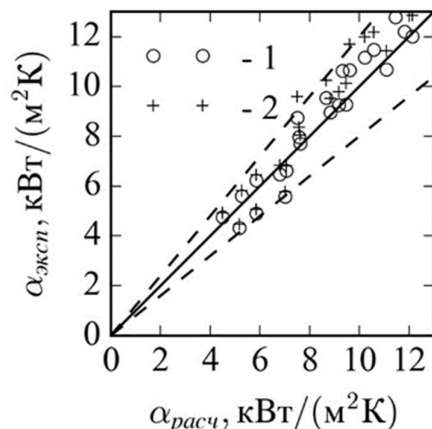


Рис. 1. Зависимость рассчитанных значений коэффициента теплоотдачи от экспериментально определенных [5]: 1 – с учетом орошения, 2 – без учета орошения

ЛИТЕРАТУРА

1. Гогонин И.И. Исследование теплообмена при пленочной конденсации пара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. 236 с.
2. Кирюхина Н. В., Сережкин Л. Н. Обзор экспериментальных и теоретических исследований процессов тепло-и массообмена при конденсации пара из парогазовой смеси с неконденсирующимися примесями // Вестник Калужского университета. – 2018. – №. 2. – С. 62–67.
3. Artemov V., Minko K., Yankov G., Milman O. Forced convection condensation of steam in the presence of a noncondensable gas – a numerical model // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16, August 10-15, 2018, Beijing, China, 2401-2408.
4. Артемов В.И., Минко К.Б., Яньков Г.Г. Модель конденсации пара из парогазовой смеси на поверхности горизонтальной трубы при произвольной ориентации набегающего потока // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену, 22—26 октября 2018 г., Москва, Т. 2. – С. 11-15.
5. Конденсация пара из движущейся парогазовой смеси / Мильман О.О., Крылов В.С., Птахин А.В., Кондратьев А.В., Яньков Г.Г. // Теплоэнергетика. 2018. № 12. – С. 71–77.
6. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru/> (дата обращения: 10.04.2019).

K.B. Minko^{1,2}, V.I. Artemov^{1,2}, G.G. Yankov^{1,2}, V.S. Krylov^{1,3}

¹Tsiolkovskii Kaluga State University,

²National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,

³ZAO NPVP Turbokon

SIMULATION OF THE CONDENSATION PROCESSES OF WATER VAPOR FROM THE VAPOR-GAS MIXTURE IN A CROSSFLOW THROUGH A HORIZONTAL TUBE BUNDLE

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВНУТРИ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОДОРОДА

“Водородная энергетика” (ВЭ) представляет одно из направлений развития энергетики, в которой предполагается использовать водород как единый и универсальный энергетический носитель. Для реализации основных преимуществ водорода как топлива требуется решение проблемы дешевого и экологически чистого производства водорода, а также создание конкурентоспособных по экономическим показателям систем хранения и очистки водорода.

Разработка технологий хранения и очистки водорода, отличающихся достаточной компактностью и главное – безопасностью, может быть реализована на основе химических методов, включающих и хранение водорода в форме гидридов металлов или интерметаллических соединений (ИМС) [1]. Данный способ обладает рядом преимуществ и может найти свою «экономическую нишу», так как различные технологии применения водорода предъявляют разные требования к системам его хранения и очистки. Относительно малые масса и объем всей системы важны для автотранспорта, но не так важны для стационарных установок, например, для заправочных станций, автономных энергосистем, использующих ВИЭ. Активные исследования и разработки последних десятилетий в этой области привели к созданию эффективных СНВ (сплавов накопителей водорода) для широкого диапазона рабочих температур и давлений. В технических устройствах металлогидриды находятся в виде порошкообразных засыпок с размерами твердых частиц 10^{-6} – 10^{-4} м. Большие тепловые эффекты процессов сорбции/десорбции, низкие эффективная теплопроводность и проницаемость аккумулирующей среды оказываются в числе важнейших факторов, отрицательно влияющих на динамику процессов массообмена в объеме металлогидридной засыпки. Поэтому задача обеспечения благоприятных условий для интенсификации массообмена в среде аккумулирования является весьма актуальной при создании устройств с заданными характеристиками. На практике дело осложняется еще и тем, что исходный относительно недорогой технический водород всегда загрязнен газообразными неадсорбируемыми примесями, которые могут отравлять поверхность частиц ИМС, ухудшая поглощающие свойства. Даже так называемые пассивные примеси (азот, диоксид углерода, инертные газы) хотя и

^{*)} К.Б. Минко, minkokb@gmail.com

не отравляют сплав, тем не менее, накапливаясь в объеме реактора, подавляют реакцию сорбции водорода, и воздействие примесей на процессы сорбции становится определяющим. Одним из перспективных методов очистки водорода, загрязненного примесями, является метод фильтрации через слой водородпоглощающего сплава [3]. В настоящей работе с использованием математической модели, разработанной в [4], был выполнен анализ эффективности возможных способов интенсификации процессов теплообмена в металлгидридных системах для очистки водорода. Кроме классических схем с организацией оребрения внутри засыпки, была рассмотрена возможность использования для данных целей композитных материалов (добавление в засыпку стружки из высокотеплопроводного материала, заполнение высокотеплопроводного каркаса из пеноматериалов частицами ИМС и т.д.). Полученные результаты показали, что в системах очистки водорода использование различного типа интенсификаторов теплообмена может значительно повысить эффективность работы системы. Данное обстоятельство прежде всего связано с циклической работой систем очистки, что отличает их от простых систем хранения водорода. В последних важны прежде всего массогабаритные характеристики, так как время их зарядки, хотя и является важным параметром, но не определяющим эффективность работы всей системы в целом.

Все расчеты были выполнены с использованием CFD-кода ANES [5]. Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента РФ (грант МК-829.2019.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода // Рос. хим. журн. 2006. Т. L. № 6. С. 34-48.
2. Dunikov D. et al. Biohydrogen purification using metal hydride technologies // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Т. 41. – №. 46. – С. 21787-21794.
3. Minko K. B., Artemov V. I., Yan'kov G. G. Numerical simulation of sorption/desorption processes in metal-hydride systems for hydrogen storage and purification. Part I: development of a mathematical model // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Т. 68. С. 683-692.
4. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tnweb.ru/> (дата обращения: 10.04.2019).

K.B. Minko, M.D. Nashchekin, M.V. Minko
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF HEAT AND MASS TRANSFER ENHANCEMENT IN METAL HYDRIDE SYSTEMS FOR HYDROGEN PURIFICATION

С.В. Мирнов^{1,2}, А.Т. Комов¹, А.Н. Варавва¹, А.В. Дедов¹,
И.Е. Люблинский³, А.В. Вертков³, А.В. Захаренков^{1, (*)}
¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
²АО «НИЦ РФ ТРИНИТИ»,
³АО «Красная Звезда»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ РАБОЧЕГО УЧАСТКА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

При создании экспериментальных и демонстрационных термоядерных энергетических систем и термоядерных систем ближайшего будущего, таких как, например, термоядерный источник нейтронов (ТИН) и демонстрационный термоядерный реактор ДЕМО (ДЕМО-С) [1-2], кроме проблем, связанных непосредственно со стационарным длительным удержанием плазмы возникает ряд технологических трудностей.

Одной из таких проблем является обеспечение надежной тепловой защиты высоконагруженных элементов конструкции термоядерного реактора, таких как лимитер, бланкет, системы инжекционного дополнительного нагрева, контактирующих с плазмой и потоками высокоэнергетических частиц [3].

Перспективным инженерно-физическим решением является использование в качестве материала, контактирующего с плазмой в диверторе, жидких металлов (лития, олова, сплава олово-литий эвтектического состава) в комбинации с применением капиллярно-пористых структур (КПС) для эффективной стабилизации поверхности жидкого металла в условиях работы экспериментальных систем [4]. Легкоплавкий металл, и литий в первую очередь, может сочетать функции теплоносителя, тритийвоспроизводящего материала, защитного материала приемных диверторных устройств и первой стенки.

Одной из основных проблем, возникающих при использовании жидкого металла, является выбор схемы охлаждения внутрикамерных элементов и теплоносителя, который бы отвечал условиям использования жидкого металла и не оказывал отрицательного влияния на их конструкцию в целом. Также важным аспектом этого выбора является возможные последствия протечки теплоносителя в камеру токамака-реактора.

В данной работе авторами предпринята попытка использовать в качестве теплоносителя диспергированный газо-жидкостный поток. Для этих целей в НИУ «МЭИ» создан экспериментальный стенд.

Для проведения исследований был подготовлен рабочий участок, представляющий собой цилиндрическую трубу, выполненную из нержавеющей

(*) А.В. Захаренков, zaharenkov.aleks@mail.ru

стали 12X18Н10Т. В обогреваемой зоне (центральная часть трубы длиной 100 мм) были смонтированы 8 кабельных хромель-алюмелевые термопар, как на внутренней, так и на внешней поверхности трубы. Установленные таким образом термопары, позволили определить температурный перепад в стенке мишени при различных подводимых мощностях и параметрах компонентов смеси.

Экспериментальные исследования проводились в следующем диапазоне режимных параметров: давление воды $p_{\text{воды}} = (1,0 \div 3,5) \cdot 10^5$ Па, давление воздуха $p_{\text{возд}} = (1,0 \div 4,0) \cdot 10^5$ Па, массовый расход воды $G_{\text{воды}} = 0,025 \div 0,058$ кг/с, массовый расход воздуха $G_{\text{возд}} = 0,001 \div 0,0023$ кг/с, плотность теплового потока на стенке мишени $q = 1 \div 8$ МВт/м².

Первичный анализ полученных результатов показал эффективность данного метода охлаждения. Вместе с тем, по мнению авторов, целесообразно продолжить подобные детальные исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азизов Э.А., Гладуш Г.Г., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. и др. Использование компактных токамаков в качестве источника нейтронов для решения проблем ядерной энергетики // ВАНТ. серия «Термоядерный синтез». 2009. вып. 3. с. 3–9.
2. Mirnov S.V. From pure fusion to fusion-fission Demo tokamaks // Plasma Phys. Contr. Fus. 2013. 55. 045003, pp. 9.
3. Кутеев Б.В. Источники термоядерных нейтронов для развития материалов и технологий в термоядерных и гибридных систем // 22-я конференция “Взаимодействие плазмы с поверхностью”. НИЯУ МИФИ. Москва. 23-24 января 2019.
4. Hirooka Y. et al. A Review of the Present Status and Future Prospects of the Application of Liquid Metals for Plasma-Facing Components in Magnetic Fusion Devices // Fusion Science and Technology. 2015. Vol. 68:3. p.477.

S.V. Mirnov^{1,2}, A.T. Komov¹, A.N. Varava¹, A.V. Dedov¹,
I.E. Lyublinski³, A.V. Vertkov³, A.V. Zakharenkov¹

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

²JSC «SRC RF TRINITI»,

³JSC «Red Star»

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HEAT EXCHANGE BY COOLING THE WORKING SECTION BY DISPERSED HEAT DRIVE FLOW DURING INDUCTION HEATING

ВЛИЯНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ НА ГИДРОДИНАМИКУ И ТЕПЛООБМЕН В СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Представлены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований по изучению условий образования устойчивых вихревых структур в вязких нейтральных и электропроводных средах. Проведенные расчетно-аналитические исследования сложной гидродинамики трубопроводных систем компенсации давления и парогенераторов транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) показали, что при наличии геометрии областей течения, имеющих не только трехмерную кривизну, т.е. изгибные участки с кривизной в различных плоскостях, спиральную геометрию, но и переменную площадь проходного сечения каналов, создаются условия, приводящие к крупномасштабному вихреобразованию и закрутке потока. При этом реализуется не только режим закрученного течения, но и эффект, который может быть назван кризисом закрученного потока.

Одним из важных результатов проведенного расчетно-теоретического моделирования явилось объяснение наблюдаемого на практике негативного эффекта снижения теплогидравлической эффективности судовой парогенерирующей установки (ППУ), приводящего к снижению термического КПД ППУ и увеличению потерь давления при превышении определенного уровня мощности ядерного реактора. Объяснение данного явления основано на представлениях, заложенных И.И. Новиковым и связанных с открытием явления критического расхода при истечении закрученного потока [1]. В работе [2] было обосновано, что открытие [1] применимо и к замкнутым циркуляционным трактам: аналитические соотношения, полученные для замыкания модели трансформации вихря, дали возможность определить условия, приводящие к «запиранию» расхода рабочего тела, обусловленного наступлением кризисного режима закрученного течения в замкнутом циркуляционном тракте.

Обоснование выбора расчетных моделей для численных расчетов проводилось путем сравнения результатов физических и вычислительных экспериментов. На основе рассмотрения тестовых задач с проведенным сравнительным анализом результатов верификации применения различных моделей турбулентности для расчета высокоскоростных течений в криволинейных каналах с переменным проходным сечением было принято решение преимущественного использования $k-\omega$ -SST модели турбулентности.

(*) О.В. Митрофанова, omitr@yandex.ru

В целях выявления механизма вихревой структуризации течений в электропроводной жидкости, помещенной в магнитное поле, были проведены эксперименты по изучению взаимосвязи электрического, магнитного и вихревого полей в жидкой электропроводной среде. В экспериментах удалось получить хорошо воспроизводимые и визуализируемые картины спирально-вихревого течения, приводящего к крупномасштабной закрутке потока. В результате численного моделирования показано, что наличие крупномасштабных вихреобразований приводит к генерации флуктуаций индуцированного магнитного поля в масштабах всего канала. При этом конфигурация индуцированного вихревого магнитного поля в движущейся проводящей среде зависит от взаимной ориентации спирально-вихревого движения и направления внешнего магнитного поля. Данное направление работ актуально для гидродинамики реакторов на быстрых нейтронах, где в качестве теплоносителей применяются жидкие металлы, циркулирующие по геометрически сложному замкнутому контуру.

Анализ аварийных ситуаций, возникающих при эксплуатации ядерных энергетических установок, парогенераторов, теплообменников и т.п. показывает, что процесс генерации крупномасштабных вихревых структур может подчиняться фликкер-шумовой флуктуационной зависимости, когда спектр мощности на низких частотах становится обратно пропорциональным частоте. Такая закономерность развития колебательных процессов в сложных гидромеханических системах может приводить к возникновению флуктуаций, величина которых сравнима со средними значениями параметров системы. Создание методов математического моделирования процесса генерации устойчивых вихреобразований является составной частью разработки программно-технического комплекса для диагностики резонансных режимов течения, приводящих к фликкер-шумовой опасности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант РФФИ 19-08-00223-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке. Открытие № 389 (от 18.10.1990 г.).
2. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.

O.V. Mitrofanova^{1, 2}

¹National Research Center «Kurchatov Institute»,

²National Nuclear Research University "МЕРФИ"

INFLUENCE OF VORTEX STRUCTURE FORMATION ON THE HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN COMPLEX ENERGY AND HYDROMECHANICAL SYSTEMS

**ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ
ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ТРУБАХ**

Теплообмен при конденсации на поверхности труб исследуется с помощью градиентной теплотометрии [1]. Прямое измерение теплового потока с помощью гетерогенных градиентных датчиков (ГГДТП) позволяет определить местные коэффициенты теплоотдачи, а уникально малая постоянная времени ГГДТП ($10^{-8} \dots 10^{-9}$ с) даёт возможность исследовать с их помощью волнообразование в конденсатной плёнке и течение ривулетов.

Экспериментальная установка реализует схему труба в трубе: внутренняя выполнена из нержавеющей стали (длина трубы 1200 мм, наружный диаметр 20 мм, толщина стенки 2,5 мм), а наружная – из армированного резинового рукава. Среды двигались в противотоке: водопроводная вода подавалась внутрь трубы из стали при температуре $t_{\text{H}_2\text{O}} = 22$ °С, насыщенный водяной пар с температурой насыщения, близкой к 100 °С, – в межтрубное пространство. На внешней поверхности охлаждаемой трубы установлены 3 ГГДТП (ГГДТП №1 установлен на расстоянии $x = 200$ мм от верхнего среза экспериментального участка, ГГДТП №2 – $x = 600$ мм и ГГДТП №3 – $x = 800$ мм), выполненные на основе композиции сталь 12Х18Н9Т + никель, с вольт-ваттной чувствительностью 0,008 мВ/Вт. Температура поверхности контролировалась с помощью 8 медь-константановых термопар.

Если на вертикальной трубе течение плёнки осесимметрично, то при отклонении от вертикали образуется две зоны течения: основная с минимальной толщиной плёнки и поддонная, которая развивается в нижнем секторе трубы [2, 3]. При конденсации на наклонной трубе необходимо оценить распределение плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи по всей поверхности трубы. Для этого на установке предусмотрены наклон (от 0 до 90° от вертикали с шагом в 10°) и поворот (от 0 до 180° с шагом 15°) экспериментального участка.

В результате экспериментов построены угловые теплограммы в полярных координатах. На рис. 1 представлен пример, соответствующий отклонению трубы на угол 30° от вертикали. Местная плотность теплового потока, измеренная при повороте трубы на азимутальный угол φ , отнесена к значению этой величины на верхней образующей, при $\varphi = 0^\circ$. Кроме того, экспериментально определён оптимальный угол наклона (30°), при котором средний коэффициент теплоотдачи на 10,5 % выше, чем измеренный при конденсации на вертикальной трубе.

^(*) Э.Р. Зайнуллина, zaynullinaelza@gmail.com

Показана применимость градиентной теплотметрии с использованием ГГДТП к исследованию теплообмена при конденсации на внешней поверхности наклонной трубы.

Развитием работы станет переход к датчикам теплового потока на основе анизотропного монокристаллического висмута: их вольт-ваттная чувствительность значительно выше, чем у ГГДТП, и не зависит от температуры.

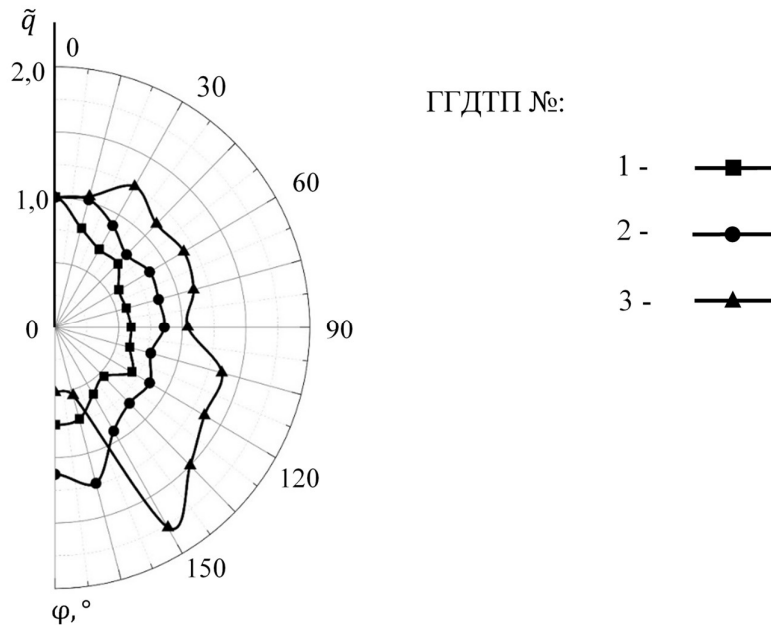


Рис. 1. Угловые теплограммы для трубы, отклонённой на 30° от вертикали

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Основы градиентной теплотметрии: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 215 с.
2. Шейнкман А. Г., Янченко В. Ф., Линецкий В. Н. О течении поддонного слоя жидкости по наружной поверхности наклонного цилиндра // Тр. Уральского поли-техн. ин-та. – 1967. – Сб. 166.
3. Nada S. A., Hussein M. S. General semi-empirical correlation for condensation of vapor on tubes at different orientations // Int. J. of Thermal Sciences 100 (2016), pp. 391-400.

V.Yu. Mityakov, E.R. Zainullina, A.Yu. Babich, A.V. Mityakov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT IN STUDY OF HEAT TRANSFER FOR CONDENSATION OF WATER VAPOR AT PIPES

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОКАХ

Электровихревые течения (ЭВТ) играют важную роль в различных электрометаллургических процессах, таких как электрошлаковый переплав и электросварка. ЭВТ образуются в проводящей среде (например жидком металле) под действием электромагнитной силы $\mathbf{F}=\mathbf{J}\times\mathbf{B}$ возникающей как результат взаимодействия электрического тока переменной плотности проходящего через эту среду с собственным магнитным полем. Мы рассматриваем движение жидкого металла в полусферическом контейнере (рис. 1).

Исследования ЭВТ проводились различными научными группами с 70-х годов 20 века. Можно отметить работы Института физики Латвийского университета [1], Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И.Носова [2], Института механики сплошных сред (г.Пермь) [3], Объединенного института высоких температур РАН (г.Москва) [4], а также ряд зарубежных работ, например, [5]. В теоретическом плане, как правило, исследовались течения с точечным центральным электродом в предположении слабых токов [5]. Такой подход позволяет рассматривать линейную модель, и заметно упрощает процесс построения решения.

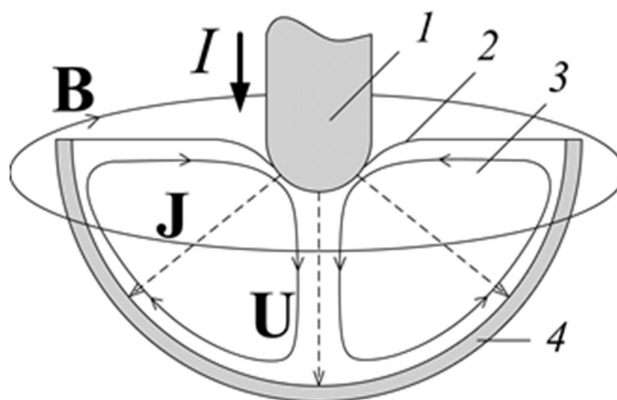


Рис. 1. Схема электровихревого течения. 1 – малый электрод, 2 – поверхность жидкого металла, 3 – жидкий металл, 4 – большой электрод

Нами было построено аналитическое решение для задачи в стоксовом приближении для электрода конечного размера, которое представляется в виде

*Е.А. Михайлов, ea.mikhajlov@physics.msu.ru

ряда по собственным функциям задачи состоящих из комбинации функций Бесселя и Неймана [6], при этом использовать граничные условия Дирихле. Более оправданные с физической точки зрения условия Тома [7] были использованы в ходе численного решения с помощью счета на установление. Для того, чтобы понять характер движения при больших токах, численно решалась нелинейная задача, учитывавшая конвективное слагаемое в уравнении Навье – Стокса.

Для существенно больших значений электрического тока начинает становиться важным учет прогиба поверхности за счет пинч-эффекта. Поскольку лоренцева сила, действующая на жидкость, сокращает площадь контакта между электродом и жидким металлом, в какой-то момент происходит отрыв жидкости с последующим зажиганием дугового разряда. Было проведено экспериментальное исследование зависимости критического тока от радиуса центрального электрода. В качестве рабочей жидкости использовался эвтектический сплав In-Ga-Sn, диаметр контейнера (большого электрода) составлял 188 мм, а диаметр малого варьировался в диапазоне 2 – 8 мм. Как качественные оценки, так и экспериментальные исследования подтвердили, что значение критического тока пропорционально радиусу электрода в степени $3/2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В. Электровихревые течения. Рига, Зинатне, 1985. 315 с.
2. Ячиков И.М., Залютдинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду. // Изв. вузов. Черная металлургия, 2014. Т. 57. С.58.
3. Денисов С.А., Долгих В.М., Манн М.Э., Хрипченко С.Ю. Электровихревой способ генерации транзитного течения через плоский МГД-канал // Магнитная гидродинамика, 1999. Т. 35. С.69.
4. Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений // Теплофизика высоких температур, 2011. Т. 47. С. 957.
5. Sozou C., Pickering W.M. Magnetohydrodynamic flow due to the discharge of an electric current in a hemispherical container // J. Fluid. Mech., 1976. V. 73. P. 641.
6. Михайлов Е.А., Тепляков И.О. Аналитическое решение задачи об электровихревом течении в полусфере с электродами конечного размера в стоксовом приближении // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2018. №2. С.39.
7. Weinan E., Liu J.G. Vorticity boundary condition and related issues for finite difference schemes // Journal of Computational Physics, 1996. V. 124. P. 368.

Е.А. Mikhailov¹, И.О. Teplyakov², И.А. Fedotov^{1,2}

¹M.V.Lomnosov Moscow State University,

²Joint Institute for High Temperatures of RAS

RESEARCH OF ELECTROVORTEX FLOWS IN LIQUID METALS FOR DIFFERENT CURRENTS

СВЯЗЬ ТЕПЛООБМЕНА С МИКРОСТРУКТУРОЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ДИСКРЕТНО ШЕРОХОВАТОМ КАНАЛЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований структуры течения и теплообмена в канале с одиночным выступом на стенке и с дискретно шероховатой стенкой (рис. 1). В канале сечением 150x115 мм в качестве элементов шероховатости использовались поперечные выступы квадратного сечения высотой $h=9,5$ мм и полукруглые выступы высотой $h=2$ мм. Шаг между выступами изменялся от 10 до 20 высот.

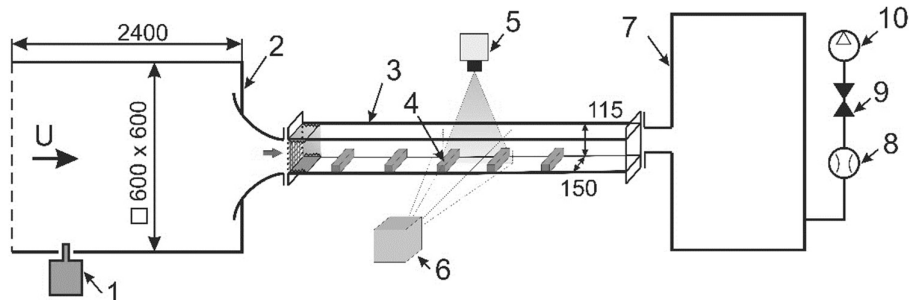


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – генератор дыма; 2 – камера подготовки дыма; 3 – рабочий участок; 4 – массив выступов; 5 – непрерывный лазер; 6 – скоростная видеокамера; 7 – ресивер; 8 – критические сопла; 9 – запорная арматура; 10 – воздуходувка

Динамика мгновенных полей скорости потока измерялись методом SIV [1]. Для измерения локальных значений коэффициента теплоотдачи использован метод, основанный на электрическом нагреве стенки и измерении ее температуры одним и тем же элементом, выполненным из тонкой металлической пленки с высоким температурным коэффициентом сопротивления [2].

Получена как детальная информация о динамике структуры течения при обтекании элементов шероховатости, так и характеристики турбулентности в отрывной области и распределение локального коэффициента теплоотдачи в следе за высоким выступом. Вихревые структуры выделялись на основе Q -критерия [3]. На основе осциллограмм нормированного Q -критерия (рис. 2) установлено, что в случае полукруглых выступов малой высоты в потоке формируются более интенсивные вихри, которые на высоте вершин выступа имеют интегральный масштаб $2.5h$ и следуют в среднем с относительной частотой $fh/U=0.043$.

^(*) Н.И. Михеев, n.miheev@mail.ru

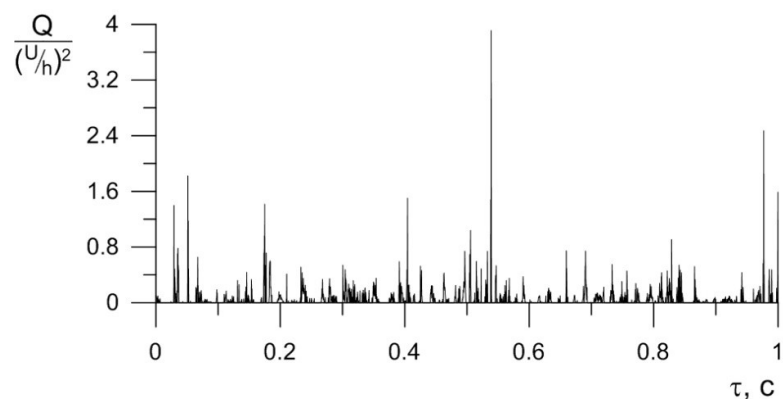


Рис. 2. Оциллограмма нормированного Q-критерия на высоте вершин выступов при обтекании дискретной шероховатости

Выполнена оценка связи локальных коэффициентов теплоотдачи с локальными гидродинамическими характеристиками течения в пристеночной зоне рециркуляционной области. Установлено, что локальный теплообмен в области рециркуляционного течения в отрывной области пропорционален относительным пульсациям скорости на внешней границе пограничного слоя возвратного течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-08-00421).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikheev N.I. and Dushin N.S. A Method for Measuring the Dynamics of Velocity Vector Fields in a Turbulent Flow Using Smoke Image-Visualization Vide // Instruments and Experimental Techniques, 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 880–887.
2. Dushin N.S. et al. Lowering the Systematic Error in Measurements of Local Heat Transfer Coefficient by Electric Heating of a Plane Wall // Russ. Aeronaut. 2017. Vol. 60, № 4.
3. Hunt J., Wray A., Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows // Proc. of the Summer Program of the Center for Turbulence Research. 1988. pp.193- 208.

N.I. Mikheev, N.S. Dushin, O.A. Dushina, R.R. Shakirov
FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences

CORRELATION BETWEEN HEAT TRANSFER AND MICRISTRUCTURE OF TURBULENT FLOW IN RIBBED CHANNEL

**ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКАЯ МЕТАНО-КИСЛОРОДНАЯ
ДЕТОНАЦИОННАЯ ГОРЕЛКА МОЩНОСТЬЮ 7 МВт
ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

Импульсное воздействие детонационной волны и сопутствующего высокоскоростного и высокотемпературного струйного потока в ряде технических применений имеет преимущества перед стационарными струями. Создание длительной последовательности детонационных импульсов, следующих с высокой частотой ставит ряд сложных научных и технических задач.

В настоящей работе рассматривается генератор периодических детонационных волн, распространяющихся в смеси метан-кислород с различными значениями коэффициента избытка окислителя.

Для возбуждения детонационной волны в газовом потоке определяющее значение имеет качество смешения топливной и окислительной компонент смеси. При организации периодического режима детонации с высокой частотой В периодическом режиме появляется два дополнительных требования: (1) полная эвакуация продуктов детонации из реакционного объема и (2) заполнение реакционного объема равномерно перемешанной топливно-окислительной смесью. Эти процессы необходимо полностью завершить к началу следующего цикла детонации.

Особенности задачи, рассматриваемой в настоящей работе - высокая частота детонационных импульсов (~50 Гц) и большая средняя мощность (~7 МВт). В этом диапазоне параметров поток смеси является околосзвуковым, что практически не дает возможности использовать диффузионный механизм для перемешивания на масштабах камеры в целом. Разработана газодинамическая схема смесителя, который обеспечивает турбулентное (механическое) перемешивание компонент до такого уровня масштабов неоднородностей, который в дальнейшем окончательно выравнивается за счет диффузии за время между циклами детонации.

Разработана вычислительная CFD-модель, проведен цикл работ по моделированию смесителя, оптимизирована геометрия и режим работы в рамках выбранной схемы.

(*) А.В. Савин, izooandrey@inbox.ru

По результатам численного моделирования процесса подготовки детонирующей смеси и самого процесса детонации (на основе моделей и данных [1, 2]) создан экспериментальный стенд, включающий смесительную камеру, детонационный канал и систему подачи рабочих сред. Для инициации используется электрический разрядник с энергией $\sim 1 \dots 10$ Дж с системой синхронного поджига от высоковольтной конденсаторной батареи.

В результате экспериментов показано, что режим периодической детонации с частотой несколько десятков герц возможно реализовать на уровне средней тепловой мощности порядка нескольких мегаватт. Получены данные по необходимой энергии иницирующего разряда, возможности формирования и параметрам детонационной волны при различных составах смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я.Б.Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматлит, 2008, 656 с.
2. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

A.A. Moiseev², V.E. Nikolsky², P.G. Smirnov², A.V. Savin¹
¹Baltic State Technical University “Voenmeh”,
²“Concern “Jet Technologies” Ltd

PULSE-PERIODIC DETONATION METHANE-OXYGEN 7 MW BURNER FOR METALLURGY: SIMULATION AND REALIZATION

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЗАКРУЧЕННОМ КАНАЛЕ

В докладе представлены результаты численного решения задачи горения угле-метано-воздушной смеси в закрученном канале. Целью исследований являлось определение условий устойчивого горения угле-метано-воздушной смеси в зависимости от размера и массовой концентрации частиц угольной пыли и скорости подачи смеси на входе в закрученный канал.

Физико-математическая постановка задачи основана на работах [1 – 2]. Угле-метано-воздушная смесь поступает в «Swiss-roll» горелку, со скоростью U_{in} и температурой T_{in} , предполагается, что внешние стенки горелки теплоизолированы. Холодная смесь нагревается от стенок горелки до температуры, при которой начинаются химические реакции в газе и на поверхности частиц. Тепло от химической реакции идет на поддержание устойчивого горения смеси. Подогрев входящей смеси осуществляется через тонкие стенки рекуперативного канала. Модель горения угле-метано-воздушной смеси построена при следующих допущениях: течение газа двумерное стационарное, газовая смесь представляет собой многокомпонентный вязкий идеальный несжимаемый газ, состоящий из кислорода, метана, летучих веществ угля, оксида углерода, диоксида углерода, паров воды, водорода и азота. В газовой фазе протекают четыре реакции окисления, в которых участвуют метан, летучие вещества угля, оксид углерода, водород, и реакция разложения диоксида углерода.

Параметры и методика расчета соответствовали работе [2]. Решение задачи выполнено с использованием прикладного пакета Ansys Fluent. В расчетах варьировался размер частиц, скорость подачи газа на входе в канал и массовое содержание угольных частиц в смеси.

Пример получаемых результатов расчета представлен на рисунке 1. На рисунке показана величина и местоположение максимального тепловыделения в канале. Согласно полученным результатам увеличение массовой доли частиц в смеси на входе в канал приводит к увеличению тепловыделения в области фронта. Скорость подачи не является предельной для указанных случаев, увеличение скорости подачи приводит к перемещению фронта горения вглубь канала. Из расчетов получено, что уменьшение радиуса частиц приводит к формированию двух практически симметричных фронтов горения. Фронт горения мелких частиц находится ближе к входу горелки, чем фронт горения

^(*) К.М. Моисеева, Moiseeva_KM@t-sk.ru

крупных частиц. Уменьшение массовой доли мелких частиц приводит к уменьшению величины тепловыделения в области фронтов пламени, также формируются симметричные фронты пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

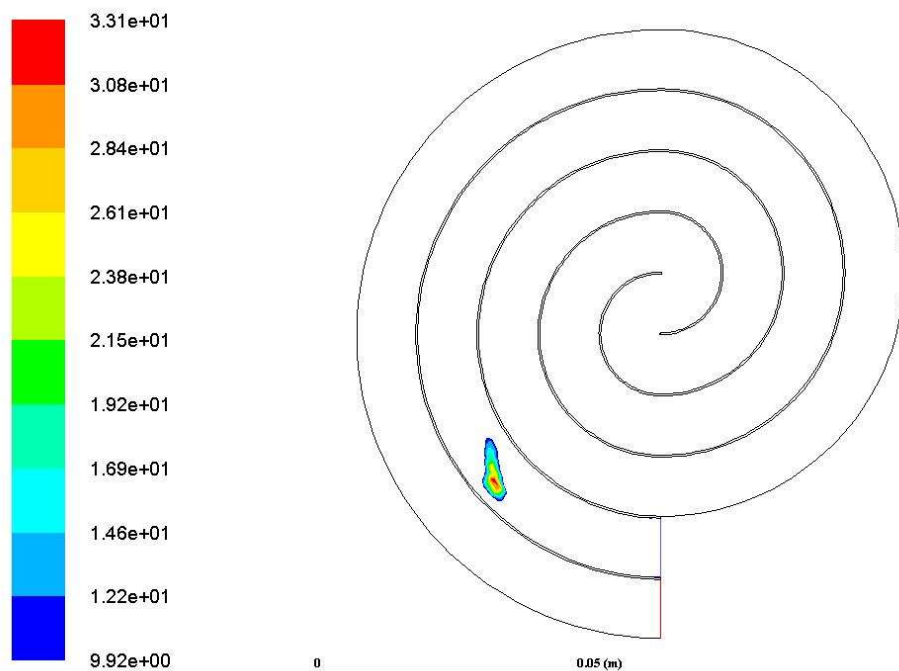


Рис. 1. Максимальное тепловыделение при горении взвеси угольной пыли с частицами радиуса $r_k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, массовой концентрацией $\rho_k = 0.3 \text{ кг/м}^3$ при скорости подачи 0.1 м/с

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Моисеев Д. М. Устойчивость горения полидисперсной угле-метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла// Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, 2017. № 48. С. 82-90.
2. Minkov L., Moiseeva K. Combustion peculiarities of coal-methane-air mixtures in a recuperative burner// MATEC Web of Conferences, 2018. Vol. 243. 00007.

K.M. Moiseeva, A.Yu. Krainov, A. Hakimov
Tomsk State University

SUSTAINABILITY OF COMBUSTION OF COAL DUST IN A SWIRLED CHANNEL

ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИОННОГО И КОНВЕКТИВНОГО СМЕШЕНИЯ В СМЕСЯХ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕВОДОРОДЫ

Экспериментальное изучение диффузии в многокомпонентных газовых смесях показало, что при определенных условиях в системе возникают конвективные течения, интенсифицирующие парциальный массоперенос [1, 2]. Такой тип смешения не типичен для диффузии. В данной работе представлены опытные данные на границе «диффузия – концентрационная гравитационная конвекция» для многокомпонентной смеси $N_2O + He - C_3H_8 + CH_4$ при различных давлениях.

Измерения проводились на экспериментальном стенде, реализующем двухколбовый метод (рис. 1а) [2]. В верхней колбе располагалась смесь $0,431 N_2O + 0,569 He$, а в нижней – $0,439 C_3H_8 + 0,561 CH_4$. При любом значении давления плотность смеси, расположенной в верхней колбе, была меньше плотности газовой смеси, расположенной в нижней колбе. Область исследуемых давлений $0,4 - 1,8$ МПа при температуре 298 К. Продолжительность опытов 1 час. После окончания опыта газы из колб аппарата анализировались хроматографическим методом.

Опытные данные для пропана и закиси азота при различных давлениях представлены на рис. 1б. Отметим не типичный для диффузии нелинейный характер изменения концентрации компонентов от давления. Увеличение давления приводит вначале к росту концентрации как закиси азота до $p = 0,7$ МПа, так и пропана до $p = 0,8$ МПа, затем наблюдается уменьшение концентраций до $1,0$ МПа для N_2O и до $1,2$ МПа для C_3H_8 . Такое поведение зависимости концентраций продиффундировавших компонентов от давления показывает возникновение конвективных течений, значительно искажающих ожидаемый при диффузии массоперенос.

Определение областей, где проявляется кинетический переход «диффузия – конвекция», возможно получить в рамках анализа на устойчивость. Математическое исследование базируется на основе линеаризации системы уравнений механики сплошных сред для изотермических трехкомпонентных систем по отношению к малым возмущениям [3]. Для исследованной смеси $N_2O + He - C_3H_8 + CH_4$ в терминах чисел Рэлея были определены границы смены

(*) М.С. Молдабекова, mairamold@mail.ru

режимов «диффузия – концентрационная конвекция». Проведенное сравнение с опытами показало удовлетворительную сходимость с численными результатами.

Часть представленных результатов получена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта № AP05132427 «Реализация принципа конвективных сепараторов в наклонных каналах».

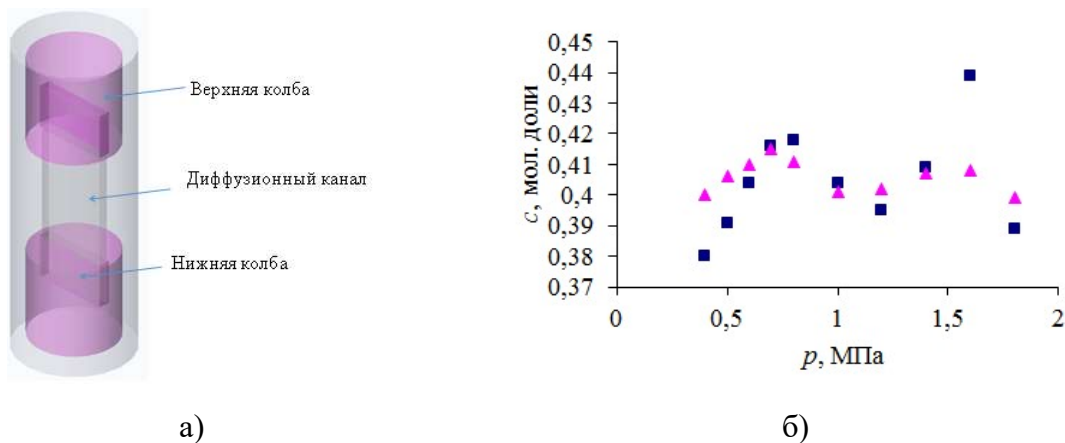


Рис. 1. Опытные результаты по смешению смеси $N_2O + He - C_3H_8 + CH_4$ в двухколбовом устройстве: а) Диффузионная ячейка метода; б) Концентрации продиффундировавших пропана и закиси азота при различных давлениях. Точки: ■ – экспериментальные данные для C_3H_8 , ▲ – экспериментальные данные для N_2O

ЛИТЕРАТУРА

1. Dil'man V.V., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. Instability in steady-state evaporation of binary solutions into an inert gas // *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2005. V. 39. No. 6. P. 566.
2. Moldabekova M.S., Asembaeva M.K., Akzholova A.A. Experimental investigation of the instability of the mechanical equilibrium of a four-component mixture with ballast gases // *J. Engin. Phys. and Thermophys.*, 2016. V. 89. No. 2. P. 417.
3. Косов В.Н., Федоренко О.В., Жаврин Ю.И., Мукамеденкызы В. Неустойчивость механического равновесия при диффузии в трехкомпонентной газовой смеси в вертикальном цилиндре кругового сечения // *ЖТФ*, 2014. Т. 84. Вып. 4. С. 15.

M.S. Moldabekova¹, M.K. Asembaeva¹, S.A. Krasikov¹, G.A. Nurtay²
¹Institute of Experimental and Theoretical Physics at Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan,
²Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan

FEATURES OF DIFFUSION AND CONVECTIVE MIXING IN MIXTURES CONTAINING HYDROCARBONS

В.М. Молочников^{1, 2, (*)}, Н.И. Михеев¹, А.Н. Михеев¹, И.И. Саушин¹
¹ФИЦ Казанский научный центр РАН,
²Казанский национальный исследовательский
технический университет им.А.Н.Туполева – КАИ

SIV ИЗМЕРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ПОПЕРЕЧНОГО КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

В работе представлены результаты экспериментальных исследований турбулентной структуры течения в ближнем следе поперечного кругового цилиндра при $Re = 3900$. Именно для этого режима течения имеется наибольшее количество опубликованных опытных данных и результатов численного моделирования. Рабочий участок установки, в котором выполнялись исследования, имел прямоугольную форму высотой 115 и шириной 150 мм. Цилиндр диаметром 15 мм и длиной 150 мм устанавливался на расстоянии 60 мм от входа в участок. При помощи техники SIV [1] выполнены измерения мгновенных векторных полей скорости потока в поперечных сечениях следа и в сечениях, параллельных образующей цилиндра (по трансверсальной координате) на различных расстояниях от цилиндра.

Получены распределения осредненных значений компонент вектора скорости потока, их среднеквадратичных пульсаций, напряжений Рейнольдса и членов генерации в уравнениях переноса кинетической энергии турбулентности. Анализ данных SIV измерений, результатов экспериментов и расчетов различных авторов показал, что форма профиля скорости в поперечных сечениях следа определяется положением этого сечения относительно продольных размеров области отрыва потока за цилиндром. Вблизи задней кромки цилиндра профиль продольной компоненты скорости имеет U-образную форму. При увеличении расстояния от цилиндра до $x/X_{отр} = 0,5 \dots 0,55$ происходит постепенная трансформация формы профиля от U-образной к V-образной. При $x/X_{отр} = 0,63 \dots 0,67$ профиль скорости принимает V-образную форму. Показана взаимосвязь формы профиля с положением области наибольшей скорости возвратного течения на оси следа.

Выполнено сопоставление уровня турбулентных пульсаций компонент скорости потока $\langle u'^2 \rangle$, $\langle v'^2 \rangle$, $\langle w'^2 \rangle$ в различных областях следа. Показано, что в окрестности внешней границы следа наибольшая анизотропия пульсаций наблюдается вблизи цилиндра: уровень $\langle u'^2 \rangle$ превышает соответствующий уровень $\langle v'^2 \rangle$ в 5 – 14 раз. На оси следа наибольшая степень анизотропии турбулентных пульсаций имеет место в области ($x/d \approx 2$): уровень пульсаций $\langle v'^2 \rangle$ превышает соответствующий уровень $\langle u'^2 \rangle$ примерно в 4,5...5 раз.

(*) В.М. Молочников, vmolochnikov@mail.ru

Получены распределения членов генерации уравнений переноса кинетической энергии турбулентности $P(u'u')$ и $P(v'v')$ (рис. 1). Установлено, что наибольший уровень $P(u'u')$ и $P(v'v')$ наблюдается в области формирования вихрей Кармана, причем максимумы $P(u'u')$ расположены вблизи внешней границы следа, а максимум $P(v'v')$ – в окрестности оси следа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-41-160022).

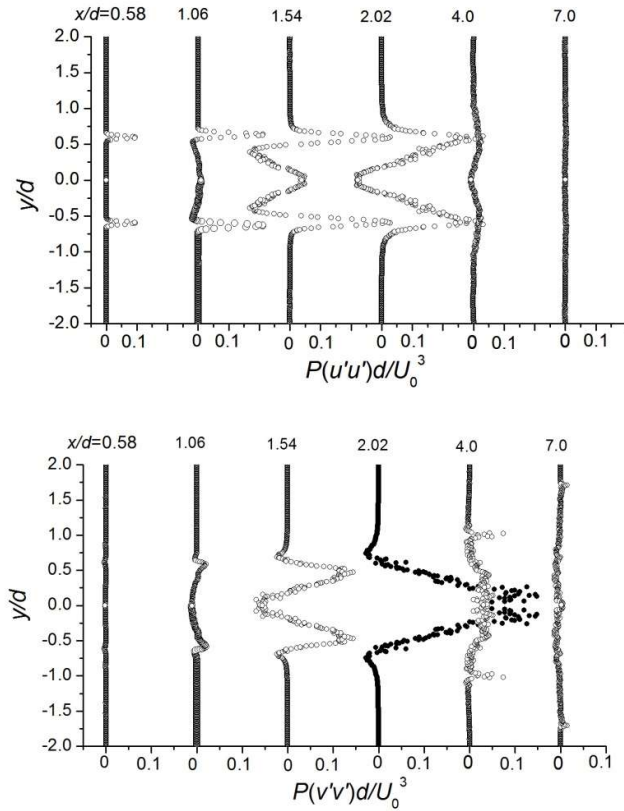


Рис. 1. Распределение членов генерации уравнения переноса кинетической энергии турбулентности в ближнем следе поперечного кругового цилиндра

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikheev N.I. et al. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Exp. Fluids. – 2017. – Vol. 58. No. 8, P. 97..

V.M. Molochnikov^{1,2}, N.I. Mikheev¹, A.N. Mikheev¹, I.I. Saushin¹
¹FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
²A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University

SIV MEASUREMENTS OF TURBULENT STRUCTURE OF THE NEAR WAKE BEHIND A CIRCULAR CYLINDER IN A CROSS FLOW

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ ДОЖИГАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ГОРЕНИИ ГЕТЕРОГЕННОГО ТОПЛИВА

В настоящее время уже проведено и проводятся множество исследовательских работ, связанных с проектированием и разработкой двигательной установки для гиперзвуковых летательных аппаратов. В этих исследованиях большое внимание уделяется комбинированным двигателям на основе прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД). Такие комбинированные двигатели могут включать в себя несколько двигательных установок различающихся назначением и принципом действия. Так для стартово-разгонной ступени рассматриваются ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ), а для маршевой ступени гиперзвуковые прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердом топливе (ГПВРДТТ). Стартово-разгонная ступень может быть как сбрасываемой, так и интегрированной с камерой дожигания ГПВРДТТ. В данной работе рассматривается комбинированный двигатель со сбрасываемой стартово - разгонной ступенью.

ГПВРДТТ могут иметь различные конструктивно-компоновочные схемы, различающиеся организацией горения твердого топлива. Схема, принятая в работе представлена на рисунке 1.



Рис. 1.

В такой схеме горение твердого топлива осуществляется в газогенераторе. Продукты сгорания (ПС) из газогенератора поступают в сверхзвуковую камеру

^(*) Д.В. Акимов, dmitry9651992@mail.ru

дожигания, где происходит их догорание в воздушном потоке, предварительно сжатом в воздухозаборнике (ВЗ).

Предметом исследования является организация эффективной работы сверхзвуковой камеры дожигания. Её эффективность определяется полнотой сгорания ПС в выходном сечении и достижением заданного значения удельного импульса ДУ.

В рамках работы для описания сложных физико-химических процессов в камере дожигания, сформирована математическая модель. В математической модели для описания многокомпонентной газовой смеси записываются уравнения сохранения, осредненные по Рейнольдцу. Взаимодействие газовой смеси с частицами учитывается добавлением источников в уравнения сохранения. Для учета турбулентности используется модель Менгера SST. Для определения полноты сгорания в математическую модель добавлены уравнения химической кинетики. Для описания движения и взаимодействия к-фазы с газофазным потоком ПС в камере дожигания записываются уравнения сохранения для частиц и уравнение радиуса кристаллизации, в комплексной постановке Лагранжа-Эйлера. Решение уравнений для газа и частиц осуществляется совместно.

С использованием математической модели проведены газодинамические расчеты по определению характеристик ПС (газодинамические характеристики и состав ПС) по длине камеры дожигания при различной организации подачи продуктов сгорания газогенератора в камеру дожигания и проведена оценка полноты сгорания твердого топлива. По результатам работы сформированы рекомендации по выбору геометрических характеристик камеры дожигания, а также по организации подачи продуктов сгорания из газогенератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование гиперзвуковых гомогенных и гетерогенных неравновесных течений при наличии сложного радиационно-конвективного теплообмена / А.М. Молчанов; - М.: Изд-во МАИ, 2017. -160 с.
2. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе: учеб. / [Б.В.Обносов и др.]; под общ. ред. В.А. Сорокина. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. - 303 с.

A.M. Molchanov, D.V. Akimov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Moscow Aviation Institute (National Research University)"

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE WORKING PROCESS IN THE AFTERBURNING CHAMBER OF THE COMBINED ENGINE WITH SUPERSONIC COMBUSTION OF HETEROGENEOUS FUEL

**РАСЧЕТ ИЗЛУЧЕНИЯ И ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ СТРУЙ,
ИСТЕКАЮЩИХ В РАЗРЕЖЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО,
НА ОСНОВЕ КВАЗИГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ**

Расчет высотных струй представляет серьезную проблему. В основном, это связано с нарушением условия сплошности разреженной среды и ярко выраженной неравновесностью между различными энергетическими модами.

Численный анализ таких течений может проводиться на основе методов прямого численного моделирования – методов Монте–Карло методов. Однако расчет этими методами также требует использования очень больших компьютерных ресурсов.

Поэтому в Институте прикладной математики разработана модель, получившая название квазигазодинамические (КГД) уравнения [1]. Этот подход основан на использовании математической модели, обобщающей систему уравнений Навье–Стокса и отличающейся от нее дополнительными диссипативными слагаемыми с малым параметром в качестве коэффициента.

Основная система включает следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \tau \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right] \right\} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \tau \left[\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j p) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i p) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\tau \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i p) \right] \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right] &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \tau \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j u_i (\rho E + 2p)] \right\} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\tau \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{2} u_k^2 p \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\tau \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{1}{\text{Pr}} \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \tau p \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho} \right) \right] \end{aligned}$$

где τ - релаксационный параметр, имеющий смысл максвелловского времени релаксации.

Дополнительные уравнения для колебательной энергии:

^(*) В.Э. Попов, vario999@mail.ru

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_{v,m}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(E_{v,m}u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\tau \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i E_{v,m}) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\tau \frac{E_{v,m}}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{1}{Pr} \tau p \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{E_{v,m}}{\rho} \right) \right] + \dot{E}_{v,m}$$

Для анализа предложенной методики рассматривалась струя модельного жидкостного двигателя. Расчет неравновесного излучения проводился по методике работы [2].

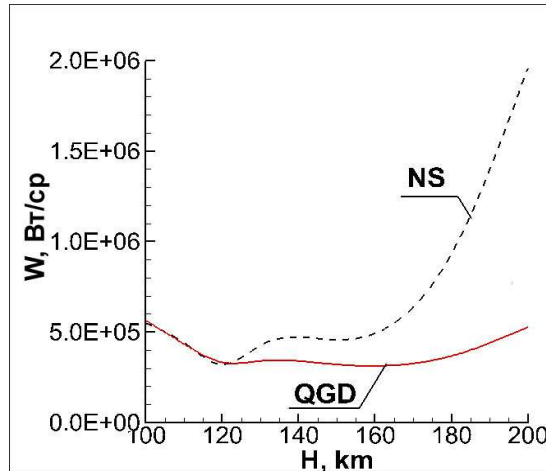


Рис. 1. Зависимость интегральной интенсивности излучения (диапазон 1÷7 мкм) от высоты:

NS - расчет с использованием уравнений Навье-Стокса с учетом термической неравновесности; QGD - расчет с использованием квазигазодинамических уравнений с учетом термической неравновесности

ЛИТЕРАТУРА

1. Елизарова Т.Г., Шеретов Ю.В. Теоретическое и численное исследование квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений, Ж. вычисл. ма- тем. и матем. физ., 2001, том 41, номер 2, с.239-255.
2. Молчанов, А.М. Расчет теплового излучения колебательно неравновесного газа методом к-распределения / Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т.16. Вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-1/articles/317/>

A.M. Molchanov, V.E. Popov
Moscow Aviation Institute (National Research University)

CALCULATION OF RADIATION AND GAS DYNAMICS OF JETS FLOWING INTO THE RARE SPACE ON THE BASIS OF QUASI-GAS-DYNAMIC EQUATIONS

БУДУЩЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

В работе рассматриваются проблемы и особенности энергетического комплекса арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) с точки зрения устойчивого развития. Освоение АЗРФ имеет стратегическое значение для социально-экономического развития страны, а энергоснабжение является одним из ключевых элементов будущего освоения, что обуславливает актуальность и значимость данной работы. Исследование направлено на решение фундаментальной научной задачи по изучению процесса развития всего комплекса возобновляемой энергетики России с целью обеспечения рационального природопользования и устойчивого социально-экономического развития страны.

Российская Арктика обладает как существенным потенциалом, так и значительной потребностью в применении ВИЭ [1-3]. Долгосрочные планы Правительства Российской Федерации предусматривают развитие хозяйственной деятельности в Арктике. Приоритетные направления развития региона связаны в основном с освоением природных ресурсов (в первую очередь биоресурсной и минерально-сырьевой базы) и использованием транспортно-транзитного потенциала региона [4].

Международный термин «устойчивое развитие» (sustainable development), применительно к социально-экономическому развитию АЗРФ как на море, так и на суше означает для авторов в первую очередь минимизацию ущерба природной среде при промышленном освоении ресурсов, снижение риска для жизнедеятельности от последствий изменения климата и погодно-климатических явлений.

Устойчивое развитие - процесс экономических и социальных изменений, при котором эксплуатация природных ресурсов, направление инвестиций, ориентация научно-технического развития, развитие личности и институциональные изменения согласованы друг с другом и укрепляют нынешний и будущий потенциал для удовлетворения человеческих потребностей и устремлений.

Изменяющиеся экологические условия и требования к соблюдению природоохранных мер стимулируют поиск оптимального использования

(*) М.О. Моргунова, maymorgunova@mail.ru

энергетических ресурсов, в том числе местных и возобновляемых источников энергии. Последствия климатических изменений (растепление многолетнемерзлых грунтов, процессы солифлюкции, термокаста, усиление эрозии почв и др.) приводят к необходимости адаптировать энергетические инфраструктурные объекты к изменяющимся природным условиям.

В работе приведены результаты: (1) географического анализа общего состояния энергетического комплекса АЗРФ с точки зрения использования различных энергетических ресурсов; (2) оценки потенциала возобновляемых источников энергии в АЗРФ; (3) влияния климатических изменений на развитие энергетической инфраструктуры в пределах жизненного цикла как действующих, так и проектируемых энергоустановок. В рамках исследования были разработаны принципы построения энергетической инфраструктуры в АЗРФ с учетом характерных особенностей региона - удалённость и малочисленность населённых пунктов, развитие крупных транспортно-логистических и производственных узлов, климатические условия и т.д. Показано, что необходимым условием будущей эффективности энергетического комплекса в АЗРФ является соответствие принципам устойчивого развития.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках исследовательского проекта № 19-08-00945 \ 19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Solovyev D.A., Morgunova M.O., Solovyev A.A. Creating a Synergy: Renewable Energy to Develop the Russian Arctic // *Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions*. : IGI Global, 2019. С. 136–153.
2. Morgunova M.O., Solovyev D.A. Challenges to overcome: Energy supply for remote consumers in the Russian Arctic // *Journal of Physics: Conference Series*. , 2017.
3. Попель О.С. и др. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации // *Арктика экология и экономика*. 2015. № 1(17). С. 65–69.
4. Бедрицкий А.И. Устойчивое развитие арктической зоны Российской Федерации и климатические аспекты экологической и гидрометеорологической безопасности // *Энергетическая политика*. 2018. № 4. С. 3–10.

M.O. Morgunova¹, L.V. Nefedova², D.A. Solovyev¹

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia,

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

THE FUTURE OF THE ENERGY COMPLEX OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION IN TERMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ СМЕСЬ МЕТАНА И ПРОПАН-БУТАНОВОГО ТОПЛИВА

Ввиду постоянного роста потребления электроэнергии и сокращения традиционных ископаемых топлив актуальным стало использование альтернативных видов топлива, таких как попутный нефтяной газ, газовые отходы нефтехимических производств, биогаз, синтез-газ, свалочный газ, шахтный газ и пр.

Ранее авторами была создана и апробирована экспериментальная водонагревательная установка для сжигания смеси метана, пропана, бутана с воздухом (Рис. 1). Установлено, что изменение концентрации пропан-бутана в смеси с природным газом до 30 % при постоянном общем расходе топлива и воздуха не приводит к изменению выходной температуры теплоносителя. Однако, во всем диапазоне концентраций происходит неполное сгорание топлива, что приводит к его нерациональному использованию и ухудшению экологических показателей процесса горения [1].

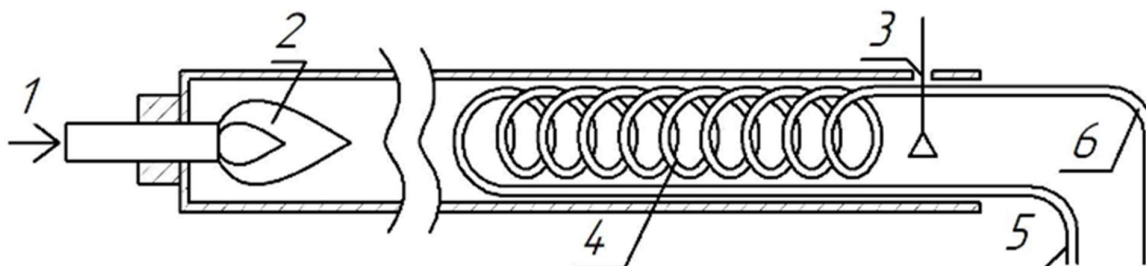


Рис. 1. Лабораторная водонагревательная установка: 1 – подача топливо-воздушной смеси; 2 – фронт пламени; 3 – газоанализатор; 4 – теплообменник; 5 – вход теплоносителя; 6 – выход теплоносителя

Целью данной работы является определение условий, соответствующих оптимальному режиму работы водонагревательной установки в случае изменения концентрации пропан-бутанового топлива в смеси с метаном. Методика эксперимента была следующая. Сначала регулировкой расходов метана и воздуха находился оптимальный режим работы установки. Далее при неизменных расходах топлива и воздуха в метан добавлялся пропан-бутан с определенной концентрацией. Затем, не изменяя концентрации пропан-бутана и расхода воздуха, общий расход снижался до тех пор, пока выходная температура

^{*)} С.А. Назарычев, nazarichev.sa@gmail.com

теплоносителя не опускалась относительно начального значения на величину, превышающую точность измерения. После этого небольшими изменениями расхода топлива и воздуха находился минимальный расход топлива и соответствующий расход воздуха, позволяющие поднять температуру теплоносителя до начального значения при полном сгорании топлива.

Начальные условия были следующие: расход топлива – метана 1,8 л/мин, расход воздуха 17,5 л/мин, температура теплоносителя на входе теплообменника 14,5 °С, на выходе – 36 °С. Задавались несколько значений концентрации пропан-бутана в топливе в интервале от 0 до 26 %. Для фиксированной концентрации пропан-бутана в интервале от 0 до 14%, чтобы восстановить начальный оптимальный режим работы с заданной выходной температурой теплоносителя, необходимо снизить общий расход топлива относительно начального значения на величину, равную относительноному увеличению удельной теплоты сгорания топлива. При этом расход воздуха в пределах точности измерения остается равным начальному значению. При увеличении концентрации пропан-бутана в топливе на величину, превышающую 14%, расход воздуха по-прежнему остается неизменным. Однако, темп снижения расхода топлива начинает отставать от темпа увеличения удельной теплоты сгорания. По мере увеличения концентрации пропан-бутана до 26% эта тенденция становится все более заметной.

Итак, результаты данной работы подтвердили ранее разработанный авторами алгоритм оптимизации процесса горения углеводородного топлива переменного состава в случае повышения его удельной теплоты сгорания на относительную величину не более 10% от первоначального значения [2]. В тоже время, результаты измерений показали, что алгоритм оптимизации работы водонагревательной установки в интервале от 14 до 26%, требует существенной корректировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. – V. 789. – 2017. – № 012045.
2. Пат. 2647940 РФ. Способ автоматической оптимизации процесса сжигания топлива переменного состава / В.М. Ларионов, Ю.В. Ваньков, Э.Р. Сайфуллин, С.А. Назарычев, А.О. Малахов // Бюл. – 2017. – №9. – 6 с.

S.A. Nazarychev, E.R. Saifullin, V.M. Larionov
Kazan Federal University

OPTIMUM OPERATING MODES OF THE WATER HEATING EXPERIMENTAL SETUP USING A MIXTURE OF METHANE AND PROPANE-BUTANE FUELS

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗГОЛЬДЕРОВ ПРИ ХРАНЕНИИ ГАЗА

Для устранения суточной неравномерности потребления газа вблизи городов сооружают емкости, в которые вмещают весь избыточный газ в ночные часы, чтобы обратно выдать его в газораспределительную сеть города. С этой целью используют газгольдеры. Газгольдеры – это сосуды большого объема, предназначенные для хранения под давлением газов [1]. Сосуды могут быть цилиндрической (вертикальные и горизонтальные) и сферической формы [2]. В зависимости от давления газгольдеры разделяют на газгольдеры низкого и высокого давления [3]. Основным материалом, который идет на изготовление газгольдеров, является сталь (листовой прокат) углеродистых и низколегированных сортов, для которых характерны хорошая свариваемость, устойчивость к деформации и хорошие характеристики пластичности [4]. Газы обладают специфическими свойствами, которые существенно влияют на организацию их хранения. Главнейшие из них – огне- и взрывоопасность [2]. Температура хранения газов осуществляется при отрицательной температуре. Постоянная низкая температура внутри газгольдера поддерживается с помощью холодильной установки. Газгольдеры покрыты тепловой изоляцией для уменьшения некоторого притока тепла через стенки, крышу и дно газгольдера. Вследствие повышения температуры внутри газгольдера при хранении происходит испарение газа. Также газы имеют большой коэффициент объемного расширения, т.е. с повышением температуры объем их значительно возрастает. В газах растворяется некоторое количество воды, причем растворимость ее возрастает с повышением температуры [4]. Соответственно температура играет очень важную роль при хранении газов. Поэтому необходимо просчитывать распределение температуры хранимых продуктов в газгольдере. Основываясь на законах теплопроводности, можно определить неоднородное распределение температуры в каждом слое газгольдера, учитывая, что слои обладают своими физическими свойствами. Теплопроводность однородных сферических и цилиндрических конструкций широко рассмотрена в работах [5] – [9]. В решениях данных работ коэффициент теплопроводности является постоянной величиной. Если рассматривать неоднородные слои газгольдеров, то коэффициент теплопроводности в общем случае зависит от координат. Решение стационарной задачи для сферического и цилиндрического многослойного газгольдера с неоднородными слоями рассмотрено в работе [10]. В случае, когда

(*) А.С. Мозгова, mozgova-energo@yandex.ru

температурное поле обладает сферической симметрией, а коэффициент теплопроводности зависит от координаты r , уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c_j \rho_j \frac{\partial T_j(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial \lambda_j(r)}{\partial r} \frac{\partial T_j(r, t)}{\partial r} + \lambda_j(r) \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_j(r, t)}{\partial r} \right) \right) + Q_j(r, t)$$

здесь $T_j(r, t)$ - температурное поле j -го слоя сферы; c_j - удельная теплоемкость j -го слоя сферы; ρ_j - плотность j -го слоя сферы; λ_j - коэффициент теплопроводности j -го слоя сферы; $Q_j(r, t)$ - внутренние источники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунчук В.А. Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Недра, 1977, - 366 с.
2. Стулов Т.Т., Поповский Б.В., Иванцов О.М., Сафарян М.К., Афанасьев В.А. Сооружение газохранилищ и нефтебаз. М.: Недра, 1973. - 368 с.
3. Сооружение газохранилищ и нефтебаз. М.: Недра, 1973. - 368 с. Киселев А.А. Газоснабжение часть II Транспортирование, хранение, распределение и использование газа. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1956. - 215 с.
4. Чуракаев А, М. Газоперерабатывающие заводы. Технологические процессы и установки. Москва, Химия, 1971. - 236 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Издательство "Высшая школа" Москва 1967 год 600 стр.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. Издательство: Наука-1964г.
7. Туголуков Е.Н. Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та с. 2006. 116с.
8. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М: Высш.шк., 2001. 550с.
9. Мельников В.В. Температурное поле трехслойной сферы // Прикладная механика и техническая физика. - 2009. - Т. 50, N 1. - С. 78-84.
10. Y V Nemirovsky, A S Mozgova Problems of thermal conductivity for storage tanks of liquefied gases and oil products IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012131.

Yu.V. Nemirovsky¹, A.S. Mozgova²

¹Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

²I. Ulianov Chuvash State University

THERMAL CONDUCTIVITY OF GAS STORAGE TANKS DURING STORAGE OF GAS

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ БИОМАСС НА ОСНОВЕ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ

В соответствии с прогнозом, разработанным Мировым энергетическим советом (МЭС), в 2050 году потребление энергии возрастет более чем в 2 раза [1]. При этом более 40 % энергетических потребностей будет покрываться за счет возобновляемых источников энергии, в том числе 32 % составит вклад биоэнергетики [2]. Потенциал России в этом отношении включает такие источники, как лесные и растительные отходы, энергетические культуры и т.д.

Особенность древесной биомассы как топлива состоит в том, что она, в отличие от нефти, угля или природного газа, достаточно рассредоточена на планете. Но стоит отметить, что биомасса имеет относительно низкую теплотворную способность и высокую влажность. Предварительная же сушка биотоплива на стадии подготовки к сжиганию является одной из проблем использования биомассы в энергетике. Необходимы оценки затрат энергии на удаление влаги, содержащейся в предназначенной для сжигания биомассы. Цель проведения исследований — оценка энергозатрат на сушку влажного лесного горючего материала и отходов лесопиления. Методика проведения эксперимента подробно описана в [3].

Одним из важнейших параметров, определяющих конструктивные и технические характеристики (температура и интенсивность воздуха) сушильных камер являются затраты энергии на удаление одного килограмма влаги.

На рисунке 1 приведены зависимости безразмерного параметра сушки, характеризующего отношение теплотворной способности биомассы к затратам теплоты на полное влагоудаление $\theta = Q_n^r / Q_\Sigma$, (Q_n^r – теплотворная способность биомассы; Q_Σ , – полная теплота процесса сушки) от безразмерной температуры внешней среды ($T_g/1000$). Можно отметить, что увеличение T_g приводит к снижению относительных затрат на испарение влаги топлива. Это обусловлено тем, что при высоких температурах внешней среды скорость испарения воды возрастает экспоненциально.

Проводя анализ полученных результатов, следует отметить, что как показали эксперименты, рост температуры внешней среды сильно влияет на скорость влагоудаления в диапазоне температур от 333 К до 393 К. При этом необходимо иметь ввиду, что в топочных камерах котельных агрегатов температура газов, которые будут окружать частицу влажной биомассы, много

^(*) Н.А. Нигай, nigay_n.a@mail.ru

выше – до 1300 К. Соответственно параметр энергоэффективности сушки будет много выше установленных в экспериментах. Но, кроме того, при высоких T_g пары воды будут деформировать частицу биомассы, и возможны процессы её диспергирования [4].

Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).

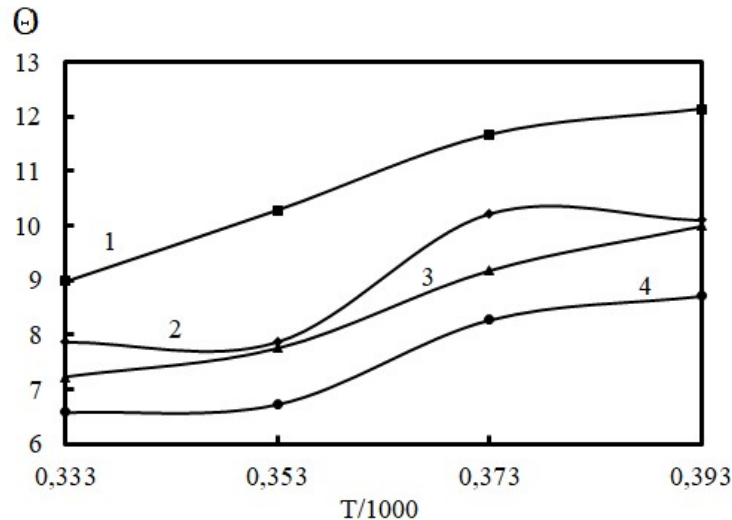


Рис. 1. Зависимости безразмерного параметра энергоэффективности сушки биомассы от температуры в камере: 1 - Дуб; 2 – Берёза; 3 - Клён ясенелистный; 4 – Тополь

ЛИТЕРАТУРА

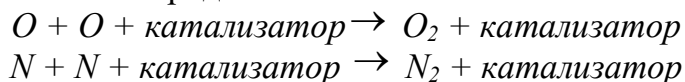
1. Нигматулин Б.И. (2017): Прогноз мирового электропроизводства на АЭС на 2015-2050 гг. Энергетическая политика 3, 78-89.
2. Parikka, M., (2004): Global biomass fuel resources. Biomass-Bioenergy 27, 613–620.
3. Bulba E. E., Ivanova N. A. (2017): Experimental investigation of the processes of dehumidification of coniferous biomass // MATEC Web of Conferences. Vol. 141, Article number 01014. - p. 1-5.
4. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V. Gutareva N.Y. (2018): Conditions of the Water–Coal Fuel Drop Dispersion at Their Ignition in the Conditions of High-Temperature Heating, Combustion Science and Technology, DOI: 10.1080/00102202.2018.1549038.

N.A. Nigay, S.V. Syrodoy
National Research Tomsk Polytechnic University

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE BIOMASS DRYING EFFICIENCY BASED ON FOREST COMBUSTIBLE MATERIALS AND SAWDUST

АЛГОРИТМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ РАСЧЁТА ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В процессе аэродинамического нагрева каталитическая активность поверхности рассматривается применительно к гетерогенным реакциям рекомбинации атомов кислорода и азота:



Эти реакции в условиях химически неравновесного пограничного слоя играют одну из определяющих ролей в процессе теплообмена.

Каталитическая активность поверхности характеризуется константой скорости поверхностной рекомбинации k_w , либо вероятностью рекомбинации γ_w - безразмерным коэффициентом, характеризующим отношение числа рекомбинировавших на поверхности атомов к полному числу атомов, достигнувших поверхности посредством процесса диффузии. Аналитическая зависимость между указанными параметрами устанавливается соотношением:

$$k_w = \gamma_w \left(\frac{R \cdot T_w}{2\pi \cdot \mu_{\text{АТОМ.}}} \right)^{0,5} \quad (1)$$

Для диссоциированного воздуха, при полной диссоциации молекул кислорода (температура потока на внешней границе пограничного слоя $T > 5000K$), рекомбинация атомов кислорода на поверхности приводит к ускоренной гомогенной рекомбинации атомов азота в объёме пограничного слоя. Например, известно, что при термодинамической температуре воздуха $T = 5000K$, массовая доля атомов азота в нем составляет лишь 5%, а при $T = 6000K$ она приближается уже к 50%. В этой связи при постановке экспериментальных исследований, воздух необходимо рассматривать как единый газ, для которого существует некая эффективная константа скорости поверхностной рекомбинации атомов кислорода и азота $k_{w, \text{эф}}$ [1].

Учитывая это, экспериментальные исследования целесообразно проводить не только на высокотемпературных ($T_w = 1700...2500K$), но и на низкотемпературных ($T_w \leq 600K$) поверхностях исследуемых образцов, учитывая, что гетерогенные реакции окисления и нитрирования исследуемых на каталитическую активность материалов могут внести значительные погрешности в результаты исследования. Поэтому при постановке таких

^(*) А.А. Шкуратенко, shkuratenko.anna@mail.ru

исследований следует стремиться полностью исключить поверхностные реакции реагирования исследуемого материала с атомарными компонентами набегающего потока.

Эксперимент строится на использовании калориметрических датчиков охлаждаемого и неохлаждаемого типа, поверхность теплоприёмного элемента которого покрывается тонким слоем (5...10 мкм) композиционного материала, подвергающегося исследованию с целью определения k_w [2]. Технология формирования тонкого слоя на поверхности теплоприёмного элемента калориметра может быть самой разнообразной. Однако она должна гарантировать выполнение следующих требований:

- покрытие должно обладать высокой адгезией;
- состав композиции в ходе технологического процесса формирования покрытия не должен изменяться.

Перерасчёт тепловых потоков проводится по следующему алгоритму. Пусть, например, в эксперименте температура поверхности калориметра с исследуемым материалом T_{W,k_w} больше чем аналогичная температура с материалом, обладающим абсолютной каталитической активностью $T_{W,k_w \rightarrow \infty}$. В этом случае, тепловой поток в горячую стенку следует привести (пересчитать) на меньшую температуру с использованием соотношения:

$$q_{0,k_w} = q_{0,k_w \rightarrow \infty} \left(\frac{I_0 - I_{W,k_w}}{I_0 - I_{W,k_w \rightarrow \infty}} \right) \quad (2)$$

где I_0 - энтальпия торможения набегающего потока, I_W - энтальпия воздуха при температуре стенки. При этом $I_{W,k_w} = C_p \cdot (T_{W,k_w} - T_{НАЧ.})$, а $I_{W < k_w \rightarrow \infty} = C_p (T_{W,k_w \rightarrow \infty} - T_{НАЧ.})$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин П.В., Шкуратенко А.А. Влияние каталитически активной поверхности на интенсивность конвективного теплообмена. // Труды МАИ. 2016. №88.
2. Шкуратенко А.А. Диагностика теплообмена в гиперзвуковых потоках с целью определения каталитических и излучательных свойств. Издательство московского университета. 2018. 171с.

P.V. Nikitin, A.A Shkuratenko
Moscow Aviation Institute
(National research University)

ALGORITHM EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CATALYTIC ACTIVITY OF THE LOYA CALCULATION OF THE HEAT FLUX

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

В настоящее время в структуре глобального энергопотребления посредством сжигания угля производится почти 40% объема мировой электрической энергии. В процессе обогащения угля образуется большое количество высокозольных отходов (фильтр-кеки), масса которых на оценивается сотнями миллионов тонн [1]. Становится актуальной масштабная утилизация шламов, отходов углеобогащения путем их сжигания в составе водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных топлив (ОВУТ). В последние годы определены интегральные характеристики процессов зажигания и горения перспективных ВУТ и ОВУТ, приготовленных на основе различных компонентов (от низкосортных углей до отходов угле- и нефтепереработки) [1,2]. Но остаются открытыми вопросы оценки эффективности использования ВУТ и ОВУТ. Наиболее рациональным представляется комплексный анализ не только энергетических и экономических показателей замены угля на суспензии, но и учет пожаровзрывобезопасности, антропогенных выбросов, зольного остатка. Цель настоящей работы – комплексный анализ основных преимуществ и недостатков сжигания ВУТ и ОВУТ в сравнении с углем.

Рассмотрены 4 вида топлива: каменный уголь «Д»; фильтр-кек «Д» в сухом состоянии; фильтр-кек «Д» во влажном состоянии; суспензионное топливо на основе фильтр-кека «Д» во влажном состоянии (90%) и отработанного турбинного масла (10%).

Для оценки эффективности использования ВУТ и ОВУТ была рассмотрена группа важных критериев: теплота сгорания, стоимость компонентов, концентрации оксидов серы и азота в продуктах сгорания, зольность, пожаровзрывобезопасность, длительности горения. При вычислении относительных коэффициентов за эталон условно принято значение 1. Показатели, которые оказались > 1 , свидетельствуют о преимуществах ВУТ и ОВУТ в сравнении с углем. В этих условиях в зависимости от выбранного критерия относительный коэффициент вычислялся как отношение рассматриваемого параметра для фильтр-кека (или ОВУТ на его основе) и аналогичного параметра для угля, либо наоборот (значение для угля делилось на аналогичное значение для фильтр-кека). Для обобщения результатов рассчитывался относительный весовой показатель ($K_{отн}$), который представлен в виде произведения относительных коэффициентов, учитывающих теплоту

^(*) Г.С. Няшина, gsn1@tpu.ru

сгорания (Q_s^a), стоимость (C), концентрации оксидов серы (SO_x) и азота (NO_x), зольность (M), пожаровзрывобезопасность (P), длительности горения (T).

$$K_{отн} = Q_s^a \cdot C \cdot NO_x \cdot SO_x \cdot M \cdot P \cdot T$$

В соответствии с расчетами получена диаграмма (рис. 1), иллюстрирующая возможность использования отходов углеобогащения (как в сухом состоянии, так и в составе суспензий) в качестве альтернативы традиционному углю. Анализ группы параметров позволил установить, что в численном эквиваленте характеристики сжигания влажного фильтра-кека лучше, чем аналогичные характеристики угля в 9.21 раза. Сравнение угля и ОБУТ показало, что $K_{отн}$ последнего выше в 2.06 раза. Фильтр-кек в сухом состоянии не имеет достаточного комплексного преимущества, его результат сопоставим с углем.

Выполненные оценки являются обоснованием целесообразности вовлечения промышленных отходов в качестве компонентов топливных суспензий. Их применение в теплоэнергетике позволит масштабно и эффективно утилизировать отходы, снизить экологическую нагрузку, а также сохранить ресурс угольных и нефтяных месторождений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-43-700001).

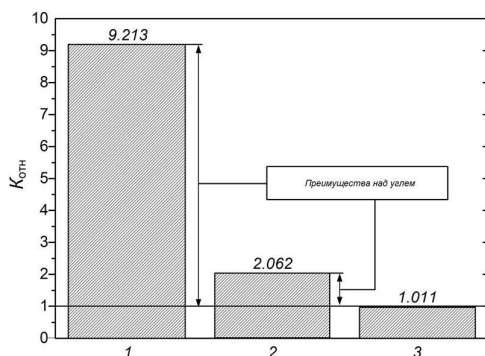


Рис. 1. Диаграмма относительных коэффициентов эффективности исследованных топлив в сравнении с углем: 1 – фильтр-кек «Д» влажный; 2 – 90% фильтр-кек «Д» влажный, 10% отработанное турбинное масло; 3 – фильтр-кек «Д» сухой

ЛИТЕРАТУРА

1. Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals // Energy, 2017 V. 120. P. 34.
2. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives // J. Cleaner Prod. 2018. V.177. P. 284.

G.S. Nyashina, K.Yu. Vershinina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak
National Research Tomsk Polytechnic University

ASSESSMENT OF THE PERSPECTIVES OF THE USE COAL SLURRY FUELS BASED ON COAL PROCESSING WASTE

АЭРОДИНАМИКА, КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛОННЫХ УСТРОЙСТВ БОЛЬШОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Циклонные камеры большой относительной длины нашли применение в промышленности и энергетике в качестве нагревательных, топочных устройств [1, 2] и других энерготехнологических установок [3]. Определяется это их высокими технико-экономическими показателями и простотой конструкции.

Выбор наиболее оптимальных значений геометрических и режимных характеристик циклонных устройств преследуют цель достижения максимальной аэродинамической и связанной с ней энерготехнологической эффективности. Основными безразмерными конструктивными параметрами, варьируемыми в опытах, являются: длина рабочего объема $\bar{L}_k = L_k/D_k = 1,00 \dots 17,25$ (L_k, D_k – длина и диаметр рабочего объема), площадь входных каналов $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/\pi D_k^2 = 0,02 \dots 0,21$, диаметр выходного отверстия $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k = 0,2 \dots 1,0$ и диаметр заготовки $\bar{d}_3 = d_3/D_k = 0,31 \dots 0,69$.

По результатам анализа и обобщения опытных данных, в качестве критерия оценки аэродинамического совершенства циклонных аппаратов предложено использовать коэффициент сопротивления, рассчитанный по тангенциальной скорости на границе ядра потока $\zeta_{фя} = 2\Delta p_{п}/\rho w_{фя}^2$ (где $\Delta p_{п}$ – располагаемый напор на входе в рабочий объем камеры; $w_{фя}$ – тангенциальная скорость на границе ядра потока, определяемого радиусом $r_{я}$).

На рис. 1 приведены зависимости изменения коэффициента $\zeta_{фя}$ от геометрических параметров исследованных в работе циклонных камер.

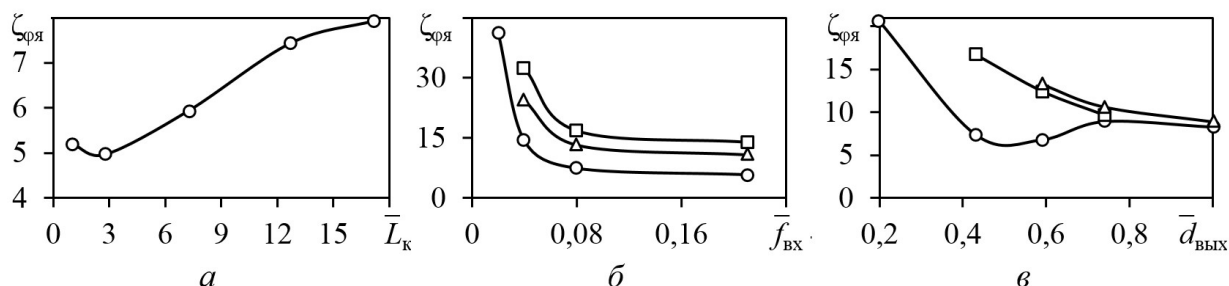


Рис. 1. Влияние параметров циклонных камер на коэффициент сопротивления $\zeta_{фя}$ в зависимости от \bar{L}_k (а), $\bar{f}_{вх}$ (б), $\bar{d}_{вых}$ (в). Обозначения: \circ – $\bar{d}_3 = 0$; \square – 0,31; Δ – 0,47

^{*)} С.В. Карпов, s.karpov@narfu.ru

Анализ опытных данных позволил установить оптимальные значения геометрических характеристик циклонных камер с точки зрения минимума затрат энергии на крутку потока: $\bar{L}_k = 2,5 \dots 3,0$; $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,08$; $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4 \dots 0,6$. При загрузке рабочего объема камеры эффективность работы рекомендуется оценивать отношением площадей выхода и входа потока, а также величиной \bar{d}_3 . В то же время, выбор оптимальных значений характеристик циклонного нагревательного устройства необходимо производить с учетом достижения максимально возможной не только аэродинамической, но и тепловой эффективности. Степень энергетического совершенства циклонных устройств можно оценить при помощи комплекса, предложенного С.В. Карповым в работе [4]:

$$K_3 = \frac{\text{Nu}}{\text{Re}_{\text{вх}}^n \zeta_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где $\zeta_{\text{вх}} = 2\Delta p_{\text{п}} / \rho V_{\text{вх}}^2$.

Оценка тепловой эффективности по K_3 в целом подтвердила выводы, полученные при помощи $\zeta_{\text{фр}}$. Например, оптимальной можно считать длину $\bar{L}_k = 10 \dots 18$, а $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,04 \dots 0,10$.

По результатам работы предложены две методики оценки аэродинамической и тепловой эффективности циклонных нагревательных устройств большой относительной длины. Выбор оптимальных значений геометрических параметров циклонных устройств позволяет значительно снизить затраты на создание и поддержание определенного оптимального уровня крутки потока, а, следовательно, увеличить КПД и уменьшить расход топлива на нагрев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Циклонные топки / под общ. ред. Г.Ф. Кнорре, М.А. Наджарова. М.: Госэнергоиздат, 1958. 216 с.
2. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
3. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве. М.: Экология, 1993. 368 с.
4. Карпов С.В., Сабуров Э.Н. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2002. 504 с.

D.A. Onokhin, A.N. Orekhov, S.V. Karpov, M.I. Konoplev
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

AERODYNAMICS, CONVECTIVE HEAT EXCHANGE AND ENERGY EFFICIENCY OF CYCLONE DEVICES WITH LARGE RELATIVE LENGTH

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ОСНОВНОГО
КОНДЕНСАТА ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБИН ДЛЯ ПОДОГРЕВА
РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ**

Существующие технологии подогрева добавочной питательной воды энергетических котлов и подпиточной воды теплосети перед водоподготовительным оборудованием промышленно-отопительных ТЭЦ не всегда обеспечивают требуемую температуру нагрева и не обладают достаточной энергетической эффективностью. В связи с этим для большинства ТЭЦ организация экономичного подогрева потоков подпиточной воды теплосети и добавочной питательной воды котлов существенно влияет на их энергетическую эффективность [1].

Авторами разработаны технологии использования основного конденсата отработавшего в турбине пара для подогрева исходной воды в дополнительных подогревателях, включенных в систему регенерации теплофикационных турбин [2, 3]. Применение данных технологий способствует увеличению расхода и понижению энтальпии пара регенеративных отборов турбины, которым подогревается этот конденсат, а, следовательно, повышает теплофикационную выработку электроэнергии [3].

Для определения промышленной применимости предложенных решений проведены экспериментальные исследования систем регенерации теплофикационных турбоустановок Ульяновской ТЭЦ-1. На основе опытных данных рассчитаны минимально и максимально возможные расходы исходной воды, которые можно нагреть до требуемой температуры в поверхностных подогревателях, включенных в систему регенерации турбин, построены графики зависимости расхода подогреваемой исходной воды от температуры основного конденсата турбин (рис. 1).

С помощью метода удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении [4] произведена оценка энергетической эффективности реализации предложенных решений. Установлено, что для ТЭЦ с турбоустановкой Т-100/120-130 наибольшая величина удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении $37,58 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ достигается при включении поверхностного подогревателя исходной добавочной питательной воды в трубопровод основного конденсата турбины перед ПНД-1 со смещением потоков деаэрированной добавочной питательной воды и основного конденсата турбины перед ПНД-2.

^(*) М.Е. Орлов, mi5h@mail.ru

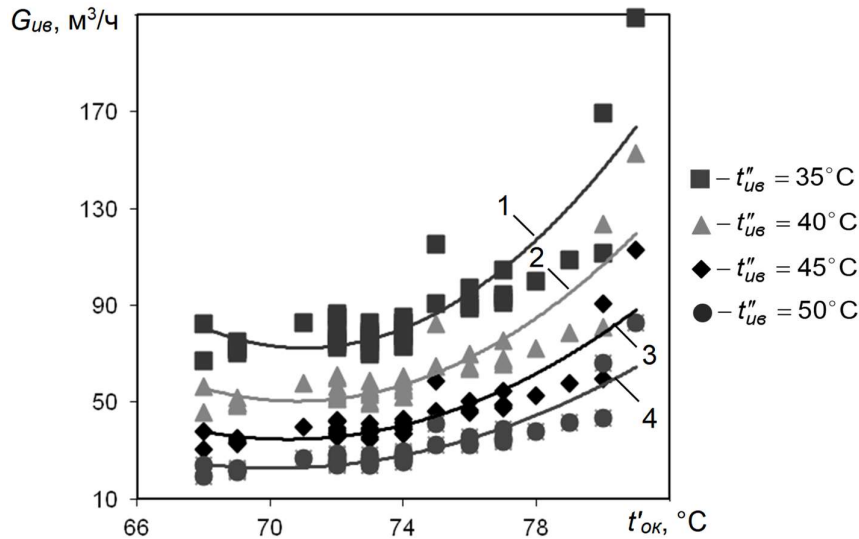


Рис. 1. Графики расходов исходной воды через подогреватель, установленный перед ПНД-2, при температурах: 1 – $t''_{ув} = 35^{\circ}\text{C}$; 2 – $t''_{ув} = 40^{\circ}\text{C}$; 3 – $t''_{ув} = 45^{\circ}\text{C}$; 4 – $t''_{ув} = 50^{\circ}\text{C}$

Результаты оценки энергетической эффективности предложенных технологий показывают, что наибольшее увеличение удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении достигается при установке поверхностного теплообменника перед первой ступенью регенеративных подогревателей низкого давления, а наименьшее – при установке теплообменника между второй и третьей ступенями регенеративных подогревателей низкого давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарапов В.И. Актуальные проблемы использования вакуумных деаэраторов в открытых системах теплоснабжения // Теплоэнергетика. 1994. № 8. С. 53-57.
2. Патент 2422646 (RU). МПК F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. 2011. №18.
3. Шарапов В.И., Кузьмин А.В. Об использовании пара нерегулируемых отборов турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей // Труды Академэнерго. 2013. №1. С. 95-110.
4. Шарапов В.И. Методика оценки энергетической эффективности структурных изменений в тепловых схемах ТЭС // Труды Академэнерго. 2015. № 2. С. 27–37.

M.E. Orlov, A.V. Kuz'min, V.I. Sharapov
Ulyanovsk State Technical University

ABOUT THE PROSPECTS OF USING THE HEAT OF THE PRIMARY CONDENSATE OF COGENERATION TURBINES FOR HEATING VARIOUS HEAT-TRANSFER AGENTS

ПАРАМЕТРЫ ГАЗА ПРИ НЕОБРАТИМОМ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ СОПЛ

Рассматривается задача о влиянии трения на параметры газа при его течении в суживающихся соплах и в соплах Лаваля при давлениях за соплами меньше критического давления. Прежде всего, в работе рассматривались параметры газа в минимальном сечении рассматриваемых сопел. Газ считался идеальным, его теплоемкость постоянна и не зависит от температуры, а поток газа является одномерным и стационарным.

Для определения параметров состояния потока газа при необратимом течении с трением было принято в качестве модели уравнение политропного процесса $p v^n = \text{const}$ (здесь p – давление, v – удельный объем газа, n – показатель политропного процесса).

При обратимом (без трения) течении газа процесс течения – изоэнтропный (рис.1), а $n = k$ (k – показатель адиабаты). При необратимом течении с трением энтропия газа увеличивается и $n < k$. Чем больше выделение теплоты трения, тем меньше показатель политропы n . В пределе $n = 1$, когда процесс течения в соплах вырождается в процесс адиабатного дросселирования, а в случае течения идеального газа – в изотермический процесс. Рис.2 позволяет сопоставить численные значения коэффициента скорости φ и показателя политропного процесса n при течении газа от давления торможения p_0 до критического давления $p_{кр}$ (рис.1).

При адиабатном необратимом (политропном, $p v^n = \text{const}$) процессе расширения газа в соплах его скорость имеет вид

$$w = \left[2 \frac{k}{k-1} R T_0 (1 - \pi^{(n-1)/n}) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\pi = p/p_0$, p – давление газа в произвольном сечении суживающегося сопла.

Используя уравнение (1), уравнение неразрывности, уравнение политропного процесса и решая уравнение $d(w/v)/d\pi = 0$ относительно π , получаем выражение для давления газа в минимальном сечении сопла

$$\pi_2 = [2/(n+1)]^{n/(n-1)}; \quad p_2 = p_0 \pi_2 \quad (2)$$

При $n = k$ уравнения (2) трансформируются в известные уравнения для $\pi_{кр}$ и $p_{кр}$. Т.к. $n < k$, то $p_2 > p_{кр}$, т.е. давление в узком сечении сопла при течении с трением p_2 больше, чем критическое давление $p_{кр}$, рекомендуемое в справочной литературе [1], как это показано на рис. 1.

^(*) Е.В. Джураева, Dzhuraeva@rambler.ru

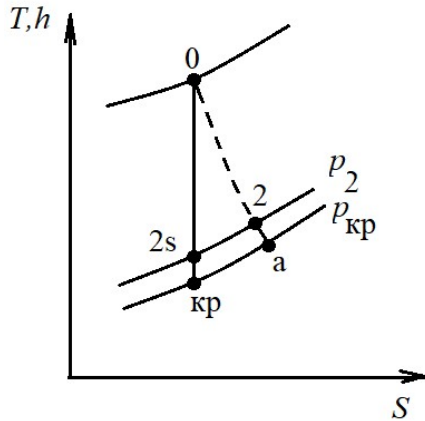


Рис.1. $T(h),s$ - диаграмма процесса истечения газа из суживающего сопла

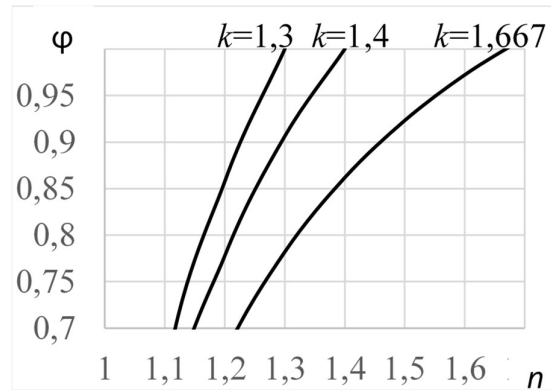


Рис.2. Взаимосвязь между коэффициентом ϕ и показателем n для одноатомного ($k = 1,667$), двухатомного ($k = 1,4$) и многоатомного ($k = 1,3$) газов

Например, для одноатомного газа ($k = 1,667$) при течении с трением, которое характеризуется показателем политропы $n = 1,4$, что соответствует коэффициенту скорости $\phi = 0,865$, $p_2/p_{кр} = 1,085$. Т.е. давление в минимальном сечении p_2 на 8,5% больше, чем критическое давление $p_{кр} = 0,487 \cdot p_0$. Соответственно, удельный объем газа v_2 меньше v_a на 5,5%, а скорость потока в минимальном сечении w_2 меньше w_a на 5%. При увеличении трения показатель необратимости n уменьшается, а отличие параметров газа в состоянии 2 от параметров в состоянии a увеличивается. В пределе, когда $n \rightarrow 1$ $p_2 \rightarrow e^{-1/2} \approx 0,607$ (e – основание натурального логарифма) для любых газов. Характер отличий между параметрами состояний 2 и a для двух- и многоатомных газов сохраняется таким же, что и для одноатомных газов, но абсолютные значения отклонений p_2 от p_a , v_2 от v_a и w_2 от w_a – меньше.

Работа поддержана РФФИ (грант №18-08-01343).

ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник. М.: Издательство МЭИ, 2001. 564с.

V.S. Okhotin, E.V. Dzhuraeva
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

PARAMETERS OF A GAS UNDER IRREVERSIBLE DISCHARGE FROM A NOZZLE

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ДЛЯ ГТУ И
ПГУ – КУ НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТ ТЕХНОЛОГИИ**

Выполнен анализ Интернет - ресурсов, которые содержат такую информацию, как: а) данные о теплофизических свойствах $R = (p, h, s, \dots)$ веществ, б) численные данные об энергетических критериях Z энергоустановок. Показано, что в настоящее время типичными являются Интернет – ресурсы, которые разработаны в ряде организаций (ОИВТ РАН, НИСТ и др.) и имеют форму текстовых файлов. Например, такой файл содержит табулированные свойства R при аргументах (p, T) и не использует программное обеспечение (ПО) для вычисления этих свойств. Это ПО имеет форму текстовых файлов. Известны другие ресурсы, позволяющие клиенту реализовать ряд опций; к последним относятся: а) введение граничных условий, $Y = (p, T)$, по которым должно вычисляться свойство R , б) вычисление значения R с помощью ПО в форме «exe-file». В этом случае ресурс (ES - ресурс) и соответствующая программа являются закрытыми для пользователя: в ПО отсутствует такая опция как «копирование математической формулы», используемой для расчета $R(p, T)$. Рядом исследователей, включая авторов этого доклада, предлагается ПО, предназначенное для расчета свойств R и имеющее форму открытого интерактивного (OS) Интернет – ресурса. Вычислительная часть OS – ресурса связана: 1) с формулой или уравнением состояния (УС), по которым вычисляется свойство R , 2) с Mathcad программой Code_1(R, Y). Интерактивная часть OS - ресурса опирается на информатику и Интернет - технологию. Нами анализируются методические приемы и инструменты, которые можно привлечь для создания OS – ресурса и которые дают возможность: а) разместить OS - ресурс на удаленном сервере, б) реализовать для клиентов ряд новых опций по сравнению с ES – ресурсами [1]. К новым опциям относятся, например, копирование математической формулы/УС или копирование кода в целом.

В докладе предлагаются OS - ресурсы, которые ориентированы на совместное использование: 1) программных кодов, которые предназначены для вычисления ряда характеристик, относящихся к циклам энергоустановок, и 2) OS - ресурсов, позволяющих вычислять свойства $R(Y)$, здесь $R = (h, s, p, T \dots)$ - свойства рабочих тел (воздух, вода и др.) при различных граничных условиях Y ; например, свойства, $R(Y) = (R_1(Y), R_2(Y) \dots)$ при параметрах $Y = (P_i, T_i)$, которые относятся к заданным i - точкам цикла, реализуемого, например, в газотурбинной установке (ГТУ) [2]. Обсуждаются результаты, полученные нами на основе этих

^(*) Е.Е. Устюжанин, evgust@gmail.com

ресурсов, в том числе данные о внутреннем КПД, $Z_1(R, Y)$, для некоторых ГТУ, а также данные об оптимизации целевой функции $Z_1(R, Y)$ применительно к ГТУ. В процессе оптимизации варьировались такие аргументы Y , как Y_1 - температура на входе в турбинный блок, Y_2 - степень повышения давления, Y_3 - повышение температуры в турбинном блоке и др.).

Разработана «Комбинированная методика формирования OS - ресурсов», которая предназначена для исследования парогазовой установки с котлом-утилизатором (ПГУ – КУ). С помощью соответствующего OS - ресурса выполнены тестовые термодинамические расчеты, нацеленные на повышение электрического КПД $Z_3(R, Y)$ ПГУ – КУ, а также на улучшение других энергетических критериев этой установки, включая снижение объема тепловых выбросов. за счет модернизации теплосиловой схемы ПГУ – КУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. F. Ochkov, E. E. Ustyuzhanin, Ch. K. Ko, V. V. Shishakov. Thermophysical Databases: From Tables to Interactive Internet Resources and Cloud Templates. High Temperatures. 2015, V 3, Pp. 56.
2. E.E. Ustjuzhanin, V.F. Ochkov, V.E. Znamensky. Development of Internet algorithms and some calculations of power plant COP. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012348.

V.F. Ochkov, E.E. Ustyuzhanin, K.A. Orlov, A.T.R. Tun, V.V. Shishakov
National Research University «MPEI»

OPTIMIZATION OF THERMODYNAMIC CYCLES FOR GAS TURBINE POWER PLANTS AND COMBINED STEAM AND GAS STATIONS ON THE BASIS OF INTERNET TECHNOLOGY

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ И
ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ
С РЕЗКИМ ПОВОРОТОМ НА 180 ГРАДУСОВ**

Каналы с резким поворотом потока на 180° служат элементами проточных частей в контурах охлаждения лопаток газовых турбин, статоров и роторов электрических машин, а также теплообменных аппаратов. Поворот канала считается резким, когда отношение радиуса поворота или изгиба срединной линии канала (R_C) меньше поперечного размера канала (H). Наличие крутоизогнутых каналов является источником повышенного гидравлического сопротивления проточных частей и, соответственно, снижает эффективность оборудования. В силу сказанного, становится актуальной задача поиска форм крутоизогнутого канала, обеспечивающих оптимальное соотношение между гидравлическими потерями и передаваемой теплотой.

В докладе представлены результаты многокритериальной оптимизации формы внутренней стенки канала при заданных числах Рейнольдса $Re = 10^5$ и Прандтля $Pr = 0.71$. Исходным служит крутоизогнутый ($R_C = 0.65H$) канал квадратного ($H \times H$) сечения с прямыми входным и выходным участками длиной $6H$ и $12H$, соответственно.

Оптимизация проведена для двух критериев: потерь давления между входом и выходом, Δp , и количества переданной теплоты, Q . Значения критериев для каждой формы канала находились по данным численного моделирования пространственного турбулентного течения на основе URANS подхода.

Численное моделирование несжимаемого течения выполнено с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Характеристики турбулентности определялись SST моделью Ментера с поправкой на кривизну линий тока. На стенках канала задавалась постоянная температура. Расчетные сетки для всех вариантов геометрии канала строились в автоматическом режиме и имели размерность около 2 млн. ячеек.

Задача оптимизации решалась с помощью собственного компьютерного кода [1]. Для использования процедуры оптимизации форма внутренней стенки канала задается шестью параметрами, которые описывают две кривых Безье четвертого порядка и соединяющую их дугу окружности радиуса r (рис. 1). В процессе оптимизации была создана база данных по потерям давления и теплообмену для 554 вариантов формы внутренней стенки.

^(*) Д.О. Панов, panov_do@spbstu.ru

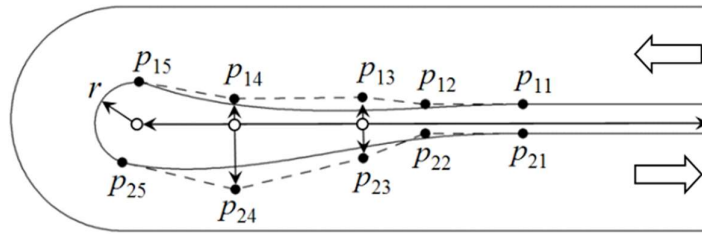


Рис. 1. Участок канала с изменяемой геометрией внутренней стенки:
 p_{ij} - опорные точки кривых Безье

На рис. 2 показано множество значений параметров оптимизации, ограниченное фронтом Парето. Кроме канала со стенкой исходной формы, изображены примеры каналов с оптимально деформированными стенками, значения критериев для которых лежат на фронте Парето.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №17-07-00569 и №17-08-00854 с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

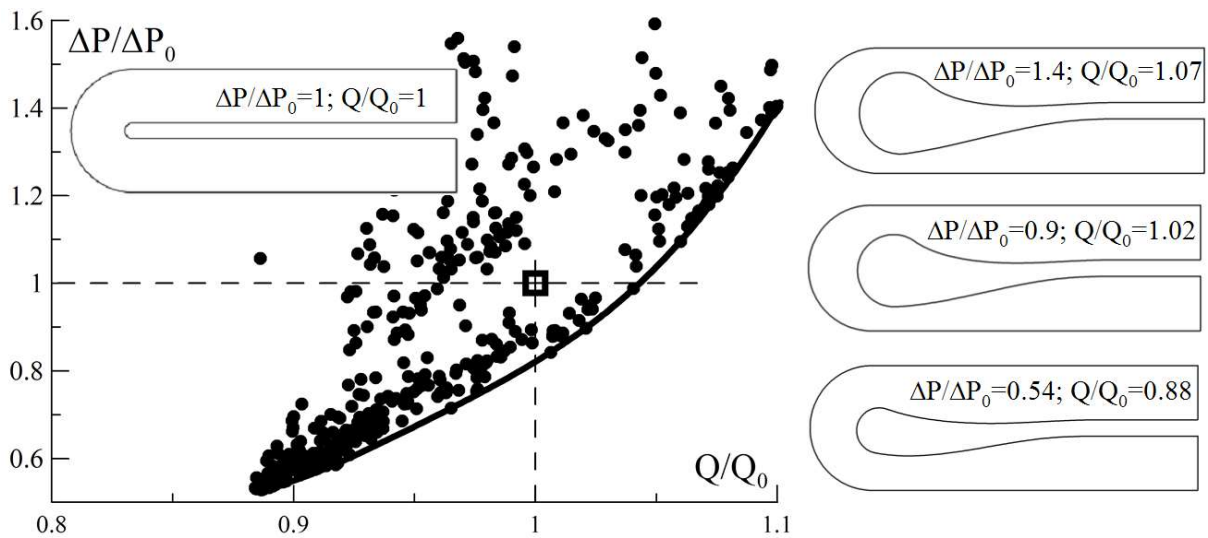


Рис. 2. Результаты оптимизации: ΔP_0 и Q_0 - потери давления и количество переданной теплоты для канала с плоской разделительной стенкой;
 линия - фронт Парето оптимальных решений

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов Д.О., Рис В.В., Смирнов Е.М., Влияние гидродинамической оптимизации на теплоотдачу в канале с резким поворотом на 180° , Труды РНКТ-7, 2018, сс. 226-229.

D.O. Panov, V.V. Ris, E.M. Smirnov
 Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

MULTIOBJECTIVE FLOW AND HEAT TRANSFER OPTIMIZATION OF A SHARP U-BEND

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЫНКОВ

Существенной особенностью российского рынка электрической энергии является его тесная интеграция с рынком тепловой энергии, которая осуществляется через тепловые электрические станции (ТЭЦ). Данные рынки имеют различные правила организации энергоснабжения потребителей. Так, рынок электроэнергии является конкурентным рынком, а рынок тепловой энергии в свою очередь – регулируемой естественной монополией рис.1.

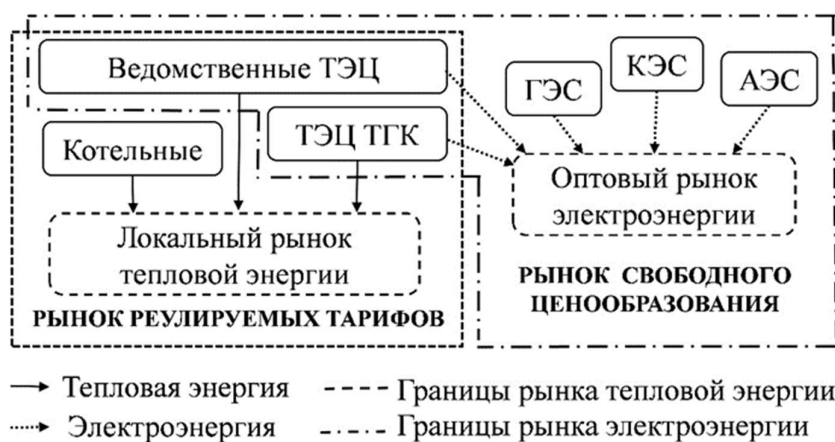


Рис. 1 . Интегрированный рынок тепловой и электрической энергии

Научно обоснованный метод назначения (разделения) цен на электрическую и тепловую энергию произведенных на ТЭЦ ни для регулируемого, ни для либерализованного рынков объективно отсутствует. Тарифы на тепловую и электрическую энергию ТЭЦ должны формироваться на компромиссной основе и рассчитываться с учетом интересов как производителей, так и потребителей (маркетинговый принцип). Рынок электроэнергии и тепла должен строиться так, чтобы он был эффективным для всех его участников – производителей и потребителей энергии. При моделировании работы интегрированного рынка тепловой и электрической энергии целесообразно рассматривать его относительно регионального (розничного рынка, на уровне агломераций), а его эффективность оценивать одним общим критерием – суммарный выигрыш энергосистемы.

^(*) А.В. Пеньковский, penkoffsky@isem.irk.ru

Такой критерий оценки эффективности предложен в модели единого интегрированного рынка тепловой и электрической энергии в [1]. Существенным недостатком данной модели является отсутствие учета составляющей по тепловым сетям и специфики (механизмы взаимодействия между производителями и потребителями) рынка тепловой энергии.

В работе предлагается математическая модель рынка тепловой энергии, для дальнейшей ее интеграции в единую модель энергетического рынка.

Исследование выполнено в рамках проекта III.17.4.4 № рег. № АААА-А17-117030310449-7 программы фундаментальных исследований СО РАН при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-48-380010 p_a

ЛИТЕРАТУРА

1. Молодюк В.В. Метод расчета тарифов ТЭЦ на региональном рынке электрической и тепловой энергии при условии достижения максимальной балансовой прибыли всех участников рынка/ Энергосовет. №48. 07. 2017 // www.energsovet.ru.

A.V. Penkovskii, V.A. Stennikov
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences

MODELING INTEGRATED ENERGY MARKETS

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА С
КОМБИНИРОВАННЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА**

Повышение энергетической эффективности тепловых электрических станций (ТЭС) возможно по пути мультигенерации [1].

Одним из наиболее эффективных производимых энергоносителей на ТЭС является водород. Перспективное использование водорода может способствовать повышению коэффициента полезного действия ТЭС [1,2].

Сдерживающим фактором применения водорода на ТЭС является его дороговизна, в качестве альтернативы водороду предлагается использовать метан. В предлагаемой работе рассматриваются пути снижения себестоимости водорода непосредственно на ТЭС. В [3] предлагается производить водород при использовании паровой конверсии природного газа с дальнейшим его использованием в высокотемпературном пароперегревателе для повышения параметров пара перед турбиной.

В данной работе разрабатывается мультигенерационный комплекс, в котором производство водорода основано на различных видах конверсии природного газа и электролизе. Водород предлагается использовать как для повышения эффективности ТЭС, так и для внешнего использования. Для производства водорода используется тепло производственных и теплофикационных отборов при рекуперативном охлаждении синтез-газа (см рис. 1).

Экономическая эффективность производства водорода и кислорода для внешней реализации была определена для паротурбинной ТЭС с электрической мощностью 230 МВт и тепловой мощностью 394 Гкал/ч при переходе на номинальные параметры работы. Капитальные затраты на дополнительное оборудование оцениваются в 22,6 млрд. руб., при производительности водорода – 493 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$ и кислорода - 16,5 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$. Стоимость водорода принималась близкая стоимости энергетически эквивалентного моторного топлива – 20 руб./ нм^3 . Проведенные расчеты показали, что ежегодная прибыль составит 37,2 млрд. руб., срок окупаемости - 1,5 года, индексе рентабельности - 1,6 и внутренней норме доходности - 60%.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по гос. заданию в рамках конкурсного отбора научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (№ заявки 13.3233.2017/ПЧ)

^(*) Д.Д. Голдобин, Goldobin.mpei@gmail.com

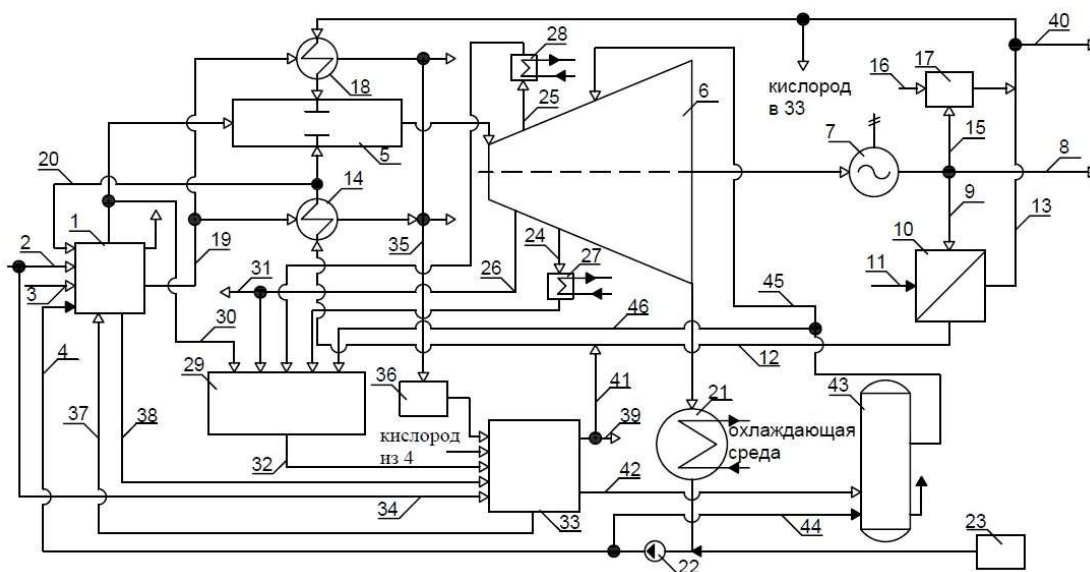


Рис. 1. Схема мультигенерационного комплекса на комбинированном топливе при дополнительном производстве водорода и кислорода: 1 – паровой котел; 2,34 - топливо; 3 – окислитель; 4,11,44 – вода; 5 – высокотемпературный пароперегреватель; 6 – паровая турбина; 7 – электрогенератор; 8,9,15 - электроэнергия; 10 – электролизная установка; 12,20,39,41 - водород; 13,40 - кислород; 14,18 - подогреватели; 16 – воздух; 17 – производство кислорода; 19,35,42 – дымовые газы; 30,31,32,45,46 – водяной пар; 21 - конденсатор; 22 – питательный насос; 23 – водоподготовительная установка; 24,25 – теплофикационные отборы; 26 – промышленный отбор; 27,28 – сетевые подогреватели; 29 – смеситель пара; 33 – производство водорода конверсионными способами природного газа; 36 – производство диоксид углерода; 37 – синтез-газ в паровой котел; 38 – синтез-газ из парового котла; 43 – котел-утилизатор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клименко, А.В. Мультигенерация на ТЭС /А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин и др. М.: Издательство МЭИ, 2019.
2. Клименко, А.В. Высокотемпературная газопаротурбинная установка на базе комбинированного топлива / А.В. Клименко, О.О. Мильман, Б.А. Шифрин // Теплоэнергетика. – 2015. – № 11. – С. 43-52.
3. Фаворский, О.Н. Патент Евразийский на изобретение № 017175 В1 МПК F01K13/00. Электрогенерирующий комплекс с комбинированным топливом О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров и др. – Заявлено 11.04.2008; опубл. 30.10.2012.

S.N. Petin, D.D. Goldobin, A.V. Burmakina
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

DEVELOPMENT OF A MULTI-GENERATING COMPLEX WITH COMBINED FUEL IN THE PRODUCTION OF HYDROGEN AND OXYGEN

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕЙ С УЧЕТОМ КОАГУЛЯЦИИ И ЗАПЫЛЕННОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Одним из источников экологически опасных субмикронных частиц в воздушной среде является эмиссия субмикронных частиц при сжигании углей. В этом случае опасность представляют не только сами частицы, но также и то, что на их поверхности могут конденсироваться различные вредные вещества, например, некоторые токсичные микроэлементы, содержащиеся в углях [1,2].

В данной работе рассматривается гомогенно-гетерогенная объемная конденсация в запыленном потоке продуктов сгорания углей с учетом процессов коагуляции. Запыленность обусловлена наличием летучей золы, образующейся после сгорания частиц угля.

Принятая модель процесса образования субмикронных частиц (капель) в продуктах сгорания углей включала: 1) образование конденсирующегося компонента (K_2SO_4) в газовой фазе в приближении термодинамического равновесия, 2) образование аэрозоля сульфата калия в процессе гомогенно-гетерогенной конденсации с учетом кинетики процесса.

С учетом результатов численного исследования, представленного в [3], в данной работе было использовано монодисперсное приближение относительно размеров пылинок. При оценке влияния процессов коагуляции учитывались соударения капель между собой (в приближении броуновской коагуляции монодисперсных сферических частиц [4, 5]) и с пылинками (столкновительная коагуляция).

В качестве объекта моделирования был использован уголь Yanzhou, КНР. Варьируемыми параметрами являются концентрация и размер пылинок, а также градиент температуры в зоне конденсации.

Согласно результатам расчетов, по мере увеличения $n_p r_p$ протяженность зоны гетерогенной конденсации на пылинках и вклад этого процесса в убыль пара возрастают (рис. 1), при этом зона гомогенной конденсации смещается в область более низких температур. Результаты расчета концентрации капель с учетом процессов коагуляции представлены на рис. 2 штриховыми и штрихпунктирными кривыми. Штриховые кривые представляют данные расчетов с учетом только броуновской коагуляции, штрихпунктирная кривая представляет данные расчетов с учетом совместного влияния как броуновской,

(*) Л.В. Петров, petrovlv@list.ru

так и столкновительной коагуляции. Видно, что влияние этих процессов невелико как для незапыленного, так и для запыленного потоков.

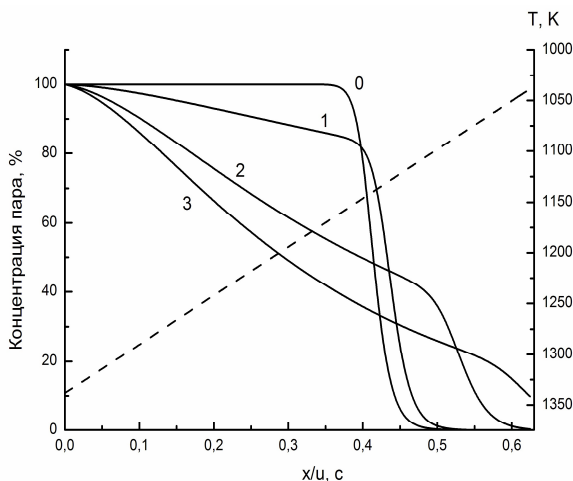


Рис. 1. Изменение концентрации пара (сплошная) и температуры (штриховая) вдоль оси канала при различных значениях $n_p r_p$:
0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500

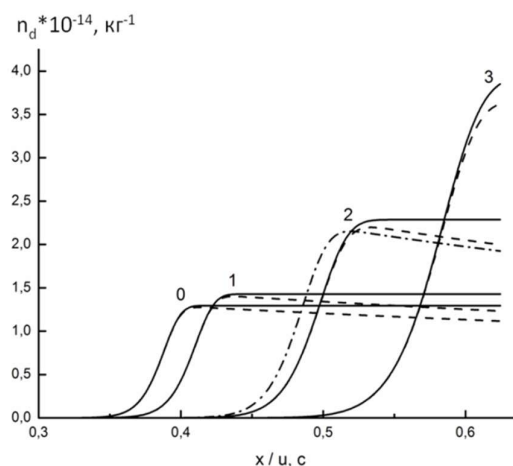


Рис. 2. Изменение вдоль оси канала концентрации капель при гомогенной нуклеации, без учета коагуляции (сплошная) и с учетом коагуляции (штриховая)

ЛИТЕРАТУРА

1. Vejahati F., Xu Z., Gupta R. // Fuel. 2010. V. 89. P. 904.
2. Soco E., Kalembkiewicz J. // Fuel. 2009. V. 88. P. 1513.
3. Корценштейн Н.М., Ястребов А.К. // Коллоид. журн. 2016. Т. 78. С. 444.
4. Giesen A., Kowalik A., Roth P. // Phase Transit. 2004. V. 77. P. 115.
5. Pathak H., Mullick K.. // Aerosol Sci. Technol. 2013. P. 1310.

L.V. Petrov^{1,2}, N.M. Kortsenshteyn¹

¹G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute, Russia,

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia

NUMERICAL SIMULATION OF SUBMICRON PARTICLES FORMATION DURING THE COMBUSTION OF COALS, TAKING INTO ACCOUNT COAGULATION AND THE DUST CONTENT OF COMBUSTION PRODUCTS

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ СУЩЕСТВОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ
АЛЮМИНИЯ В СИСТЕМЕ AL – H₂O ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К УСЛОВИЯМ РАБОТЫ СУХИХ ГРАДИРЕН**

В современной энергетике существует тенденция к переходу к ресурсосберегающим технологиям производства электроэнергии и тепла. Тепловая и атомная энергетика является одним из основных потребителей такого природного ресурса, как вода [1]. В настоящее время на большинстве ТЭС для конденсации пара применяются системы оборотного охлаждения с градирнями. В таких системах охлаждения имеются потери охлаждающей воды, составляющие, примерно 5 % от количества циркулирующей воды. В ряде стран, не обладающих значительными водными ресурсами, применяют «сухие» градирни. В них охлаждённая вода с низким содержанием примесей подаётся в смешивающий струйный конденсатор, в котором конденсируется отработавший в турбине пар, а затем часть общего потока воды на выходе из конденсатора подаётся в контур питательной воды котла или парогенератора, а другая часть возвращается на охлаждение в градирню. В ней вода проходит внутри поверхностных теплообменников, изготовленных из сплавов алюминия или стали, которые снаружи охлаждаются воздухом. Однако, применение данной технологии ограничивается другими факторами, одним из которых является водно-химический режим (ВХР), который используется на ТЭС. Если в пароводяном тракте энергоблоков используются различные по свойствам конструкционные материалы, например, стали в основном контуре и сплавы алюминия в градирнях Геллера [2], возникают проблемы с выбором ВХР, так как минимальная скорость коррозии сталей в широком диапазоне температур соответствует значениям $pH > 9$, а для сплавов алюминия $pH 6.5 - 7.0$ [3].

Для оценки возможности использования сухих градирен, при разных ВХР могут быть использованы диаграммы Пурбе. Эти диаграммы позволяют определить формы существования оксидов алюминия на поверхности сплава в зависимости от pH и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) [4]. При прохождении воды через сухую градирню её температура изменяется. Поэтому задача работы состояла в определении области значений pH и ОВП, в которой образуется устойчивости защитная пленка на алюминиевом сплаве при изменении температуры конденсата. Расчёты были выполнены для температур 25 и 75 °С (рис.1) в предположении, что концентрация ионов Al^{3+}/AlO_2^- в воде 10 мкг/дм³.

^(*) Е.А. Селиванов, SelivanovYelA@mpei.ru

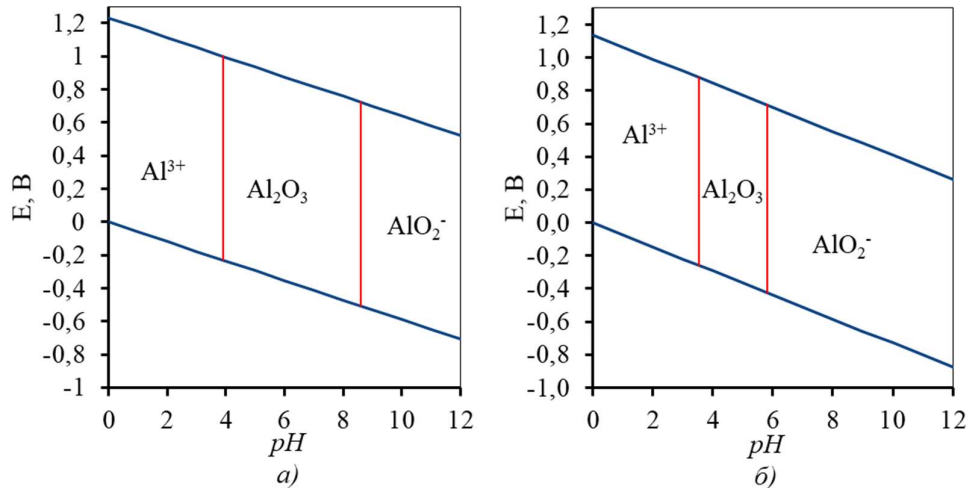


Рис. 1. Диаграммы *ОВП-рН* для системы Al-H₂O при 25 °С (1а) и 75 °С (1б)

В результате проведенных расчетов установлено, что при температуре 25 °С защитный слой из оксида алюминия образуется в диапазоне рН 3.9-8.6 и ОВП от -0.5 до 1.0 В. При температуре 75 °С область существования Al₂O₃ соответствует значениям ОВП от -0.26 до 0.87 В при рН 3.5 и ОВП от -0.42 до 0.71 В при рН 5.8. Сравнение данных по областям существования Al₂O₃ показывает, что при повышении температуры от 25 до 75 °С диапазон значений рН уменьшается со смещением в кислую область. Полученные результаты показали, что основное влияние на образование защитного слоя оказывает рН.

Таким образом, при использовании кислородно-аммиачного и нейтрально-кислородного ВХВ образование защитного слоя на поверхности алюминиевого сплава в сухих градирнях происходит при температуре 25 °С. С повышением температуры до 75 °С вероятность образования оксидного слоя Al₂O₃ снижается. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с данными по скорости коррозии алюминиевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаптев А. Г., Ведьгаева И. А. Устройство и расчет промышленных градирен КГЭУ–Казань 2004. – 180 с.
2. Сабо З. Повышение эффективности сбережения воды в системах охлаждения электростанций 2004 – 14 с
3. Мамет А. П. Коррозия и защита металла теплосилового оборудования: Диссертация доктора технических наук /. – 1951 . – 490 с.
4. Гаррелс Р. М., Крайст Ч. Л. Растворы, минералы, равновесия. – Мир, 1968.

T.I. Petrova, E.A. Selivanov
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

DETERMINATION OF ALUMINUM FORMS IN THE SYSTEM Al – H₂O FOR DRY COOLING TOWER APPLICATION

Ю.Я. Печенегов^{1, (*)}, А.В. Косов², О.Ю. Косова², Ю.А. Грачева³

¹Энгельсский технологический институт (филиал)

Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.,

²ООО «Газпром трансгаз Саратов»,

³Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПАРОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Использование водяного пара в качестве греющего теплоносителя в промышленных теплообменных устройствах часто сопровождается большими потерями теплоты с выходящим из теплообменников конденсатом и с пролетным паром, которые на предприятиях с открытыми системами сбора конденсата достигают 20 – 30 % и более от введенной теплоты.

В настоящей работе рассматриваются технические решения направленные на минимизацию тепловых потерь в паровых теплообменниках.

Образующийся из конденсата при уменьшении его давления на пути следования от теплообменника до сборного конденсатного бака вторичный пар и пропущенный конденсатоотводчиками пролетный пар наиболее целесообразно выделять путем сепарирования из пароконденсатного потока и направлять на вход теплообменника, подмешивая к исходному греющему пару. При этом отсепарированный пар должен быть сжат до давления исходного греющего пара. Для этого используется струйный или механический (например, винтовой) компрессор [1]. Показано, что при давлении сжатия свыше 0,4 МПа экономически более выгодным является использование струйного компрессора. При давлении сжатия 1,2 МПа, например, пара с расходом 1 кг/с и цене тепловой энергии 2000 руб./Гкал достигаемый эффект от энергосбережения достигает $5 \cdot 10^6$ руб./год.

Эффективным способом устранения потерь с вторичным и пролетным паром является залив части поверхности теплопередачи теплообменного устройства конденсатом греющего пара [2]. Разработана пароконденсатная система, регулирующие органы которой позволяют эффективно управлять уровнем залива, обеспечивая условия нагрева технологических продуктов. Даны рекомендации по изменению некоторых характеристик теплообменника, переведенного на работу с заливом, для сохранения неизменной его тепловой мощности. Только за счет переохлаждения конденсата в слое залива экономия греющего пара может составить 20 % и более.

(*) Ю.Я. Печенегов, y.pchenegov@mail.ru

Исключительно важную роль в обеспечении энергоэффективности паровых теплообменников имеет стабильная и надежная работа конденсатоотводчиков. Нами разработаны новые конденсатоотводчики дроссельного типа с аккумулирующей емкостью и поплавкового типа [3], обладающие повышенной надежностью. Отличительная особенность конденсатоотводчиков с закрытым и открытым поплавками состоит в использовании инверсного клапанного узла, который придает устройствам новые важные качества. Дается описание конструкции предложенных конденсатоотводчиков и их работы.

Результаты внедрения рассмотренных в настоящей работе способов и средств, повышающих эффективность использования пара в качестве греющего теплоносителя, показывают, что срок их окупаемости составляет в ряде случаев несколько недель и даже дней. Оснащение паропотребляющих аппаратов предприятия по производству автономных источников тока предложенными новыми конденсатоотводчиками привело к уменьшению энергетической составляющей в себестоимости продукции предприятия с 20 % до 3,5 %. Прекратились гидравлические удары в пароконденсатопроводах, до этого разрушающе действовавшие на арматуру и другие элементы. Улучшились условия запуска в работу паропотребляющих аппаратов за счет снижения динамических и механических нагрузок при пуске. Свечи конденсатных баков «потухли», что дало предприятию реальную экономию свыше 1000 Гкал в месяц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Печенегов Ю.Я., Косов А.В., Жибалов А.Ю. Экономическая эффективность рекуперации теплоты конденсата паровых теплообменников путем сжатия вторичного пара // Промышленная энергетика, 2013. № 1. С. 21 – 23.
2. Печенегов Ю.Я., Грачева Ю.А., Денисов В.А. Повышение энергетической эффективности паровых теплообменников // Энергобезопасность и энергосбережение, 2018. № 2. С. 21 – 24.
3. Печенегов Ю.Я., Косов А.В., Косова О.Ю. Новые поплавокковые конденсатоотводчики с инверсным клапанным узлом // Энергобезопасность и энергосбережение, 2012. № 6. С. 9 – 13.

Yu.Ya. Pechenegov¹, A.V. Kosov², O.Yu. Kosova², Yu.A. Gracheva³

¹Engels Technological Institute (branch office) of the Saratov State Technical University of Gagarin Y.A.,

²ООО «Gazprom transgaz Saratov»,

³National Research Saratov State University of N.G. Chernyshevsky

THE WAYS AND MEANS OF ENERGY SAVING IN STEAM HEAT EXCHANGERS

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНЫХ
МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМАХ ТЕЛ**

В докладе рассматривается параметрическая идентификация дифференциально-разностных моделей теплопереноса с использованием различных типов преобразователей нестационарного теплового потока (ПНТП) [1]. При этом решается прямая (ПЗТ) и обратная (ОЗТ) задачи теплопроводности, определяются температурные поля и граничные условия систем тел, в частности, высокотемпературного (~ 750 °С) многосоставного ПНТН, расположенного на поверхности исследуемого объекта [2]. Сформулированы требования к математическим моделям теплопереноса, конструктивным особенностям и теплофизическим характеристикам системы тел. Для минимизации функции невязки между модельным и экспериментальным значением искомым параметров используется фильтр Калмана по параметрам [3].

Поскольку одним из искомым параметров является нестационарный тепловой поток, восстанавливаемый с использованием ПНТП, то важным являются функции чувствительности, которые отражают все значимые факторы, а именно: вид и параметры теплопереноса в ПНТП, особенности входных воздействий, количество и месторасположение точек измерения температуры, качество каналов регистрации измеряемых величин и др. В докладе приведены выражения для функций чувствительности.

Неопределенность восстановления нестационарных потоков, в особенности высокочастотных, существенно зависит от динамических характеристик ПНТП. В работе рассмотрен способ определения динамических характеристик, а именно: переходной, импульсной, амплитудно- и фазочастотной, а также передаточной функции, с помощью программного комплекса MATLAB. Для этого необходимо использовать входящие в дифференциально-разностную модель матрицы обратных связей, управления и измерений, а также векторы состояния и управления. Динамические характеристики существенно зависят от условий размещения ПНТП на объекте исследования. В работе приведены результаты восстановления теплового потока при различных условиях теплообмена на тыльной стороне ПНТП.

Для определения доверительной области измерения искомым параметров используется матрица Грама (информационная матрица Фишера).

При реализации метода восстановления входящего в ПНТП нестационарного теплового потока был разработан, протестирован и внедрен

^(*) Н.В. Пилипенко, pilipenko38@mail.ru

программный комплекс «Heat Identification», который является 32-разрядным многопоточным приложением для операционной системы Windows, его программа написана на языке C++ в интегрированной среде Borland C++ Builder 6.

Метод и ПНТП апробирован при восстановлении нестационарного теплового потока на теплообменных поверхностях в печах кипящего слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипенко Н.В. Неопределенность восстановления нестационарного теплового потока путем параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, №7. С. 664-671.
2. Пилипенко Н.В., Казарцев Я.В. Оптимальное планирование эксперимента при идентификации процессов теплообмена сенсоров теплового потока // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, №5. С. 88-93.
3. Пилипенко Н.В. Использование расширенного фильтра Калмана в нестационарной теплотметрии при решении обратных задач теплопроводности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2019. - Т. 62. - № 3. - С. 212-217

N.V. Pilipenko, Y.P. Zarichnyak
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF DIFFERENTIAL-DIFFERENCE MODELS OF HEAT TRANSFER IN THE SYSTEM OF BODIES

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

Взаимодействие высокоскоростных струй, направленных под углом друг к другу, характерно для эксплуатации многих объектов авиационной и ракетно-космической техники. Режимы такого взаимодействия наблюдаются при управлении летательными аппаратами с помощью изменяемого вектора тяги или выдува управляющих струй [1]. В этом случае набегающий поток, по сути, является бесконечной струей, а отклоненный истекающий поток силовой установки или выдуваемое под углом к поверхности ЛА управляющее течение играют роль второй струи. Взаимодействие таких течений с набегающим потоком приводит к изменению направления движения летательного аппарата.

В данной работе численными методами исследовались эффекты взаимодействия двух взаимно-перпендикулярных струй, одна из которых является набегающим потоком, а вторая – выдуваемой управляющей струей. При проведении математического моделирования [2] варьировалась скорость набегающего потока, а скорость и расход истекающего перпендикулярного течения оставалась постоянной. Исходные данные для расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

Номер расчета	T, К (температура набегающего потока)	T, К (средняя статическая температура на срезе сопла)	M_∞ (число Маха набегающего потока)	P_∞ , Па (статическое давление набегающего потока)	P, Па (статическое давление на срезе сопла)
1	300	900	1,2	25600	3,10e05
2	300	900	2	25600	3,10e05
3	300	900	2,8	25600	3,10e05

При взаимодействии двух потоков наблюдалась деформация более слабой по содержанию внутренней энергии выдуваемой управляющей струи. Было отмечено, что степень деформации струи, форма сжатого слоя перед препятствием, а также образующейся зоны разряжения могут претерпевать сильные изменения в зависимости от скорости набегающего потока. Происходит поворот струи в сторону спутного потока. Визуализация полученных в расчетах полей давления и температуры в области взаимодействия струй представлены на рисунках 1 и 2.

^{*)} И.М. Платонов, xenogear90@mail.ru

Образующиеся зоны сжатия и разряжения повторяют контур малой струи и также разворачиваются в сторону основного течения. На рисунках видно, что при увеличении скорости набегающего потока образующийся сжатый слой имеет больший угол наклона, зона высокого давления при этом имеет более протяженный характер. За струей образуется зона с низкой скоростью и низким давлением. При росте числа Маха основного потока боковая струя быстрее поворачивается, и зона низкого давления сжимается, а контуры скорости показывают более скорое слияние двух струй.

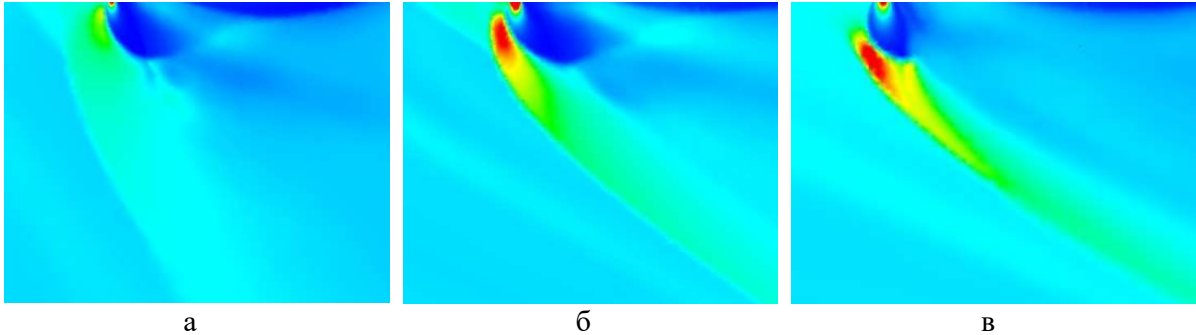


Рис. 1. Поля давлений в области взаимодействия струй.
а – $M=1.2$, б – $M=2.0$, в – $M=2.8$

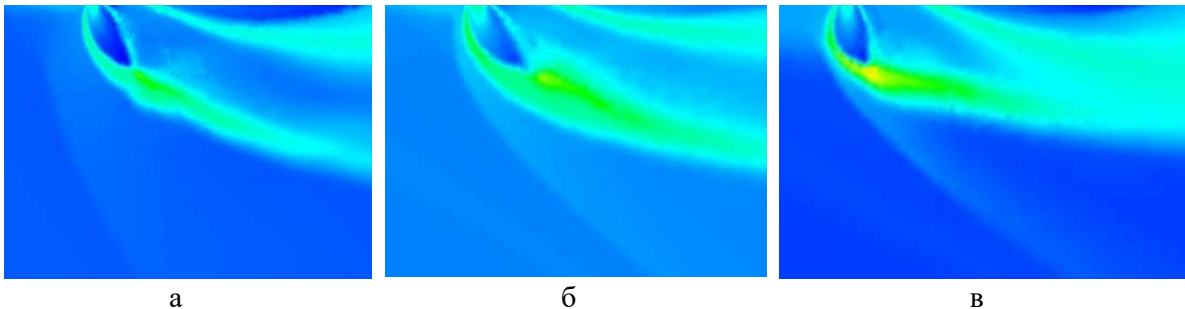


Рис. 2. Поля температур в области взаимодействия струй.
а – $M=1.2$, б – $M=2.0$, в – $M=2.8$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование процессов обтекания и управления аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов / В. Т. Калугин, Г. Г. Мордвинцев, В. М. Попов; под ред. В. Т. Калугина. - Москва: Издательство МГТУ, 2011. - 527 с.
2. Быков Л.В., Пашков О.А., Правидло М.Н. Математическое моделирование обтекания изделия ракетной техники при транс- и сверхзвуковых режимах полета // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, № 1, С.48-55.

I.M. Platonov, L.V. Bikov
Moscow Aviation Institute (National Research University)

GAS-DYNAMIC EFFECTS OF INTERACTION BETWEEN SUPERSONIC JETS

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО
ВПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С НАДДУВОМ**

Известно, что газодинамическое совершенство впускных систем поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) во многом определяет качество процессов газообмена, а также процессов смесеобразования и сгорания [1, 2]. В частности, присутствие крупно- и/или мелкомасштабных турбулентных вихрей оказывает существенное влияние на гидродинамическое сопротивление впускного трубопровода, а их наличие в цилиндре ДВС определяет условия перемешивания воздуха и топлива [3, 4]. Основной целью исследований является провести сравнительный анализ спектров газодинамических характеристик потоков во впускных системах поршневых ДВС с наддувом и без него, а также оценить степень влияния турбокомпрессора (ТК) на структуру течения.

Исследования проводились на экспериментальной установке, которая представляла собой одноцилиндровую модель поршневого двигателя, оснащенную системой наддува на основе ТК. Коленчатый вал двигателя приводился во вращение с помощью электродвигателя, ротор ТК вращался за счет подачи сжатого воздуха на лопатки турбины. В ходе опытов определялись мгновенные значения местных скорости w_x и давления p_x во впускной системе. Скорость потока измерялась посредством метода термоанемометрирования, давление потока – быстродействующим датчиком давления. Более подробно экспериментальная установка и методика проведения опытов показана в [5].

Проводился спектральный анализ зависимостей $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$ для всех исследуемых режимов работы (рис. 1). На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- установка турбокомпрессора приводит к существенному изменению структуры газовых потоков во впускной системе ДВС, в частности, возрастают низкочастотные (до 45 %) и высокочастотные (до 25 %) амплитуды пульсаций w_x при сохранении кратности значимых частот;

- величина частоты вращения ротора турбокомпрессора оказывает основное влияние на низкочастотные (до 50 Гц) амплитуды пульсаций w_x и p_x при сохранении кратности значимых частот;

- предложен способ стабилизации газового потока во впускной системе ДВС с наддувом на основе принципа хонейкомба, который приводит к снижению низкочастотных амплитуд пульсаций w_x и p_x вплоть до 30 %.

^(*) Л.В. Плотников, leonplot@mail.ru

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта №18-79-10003.

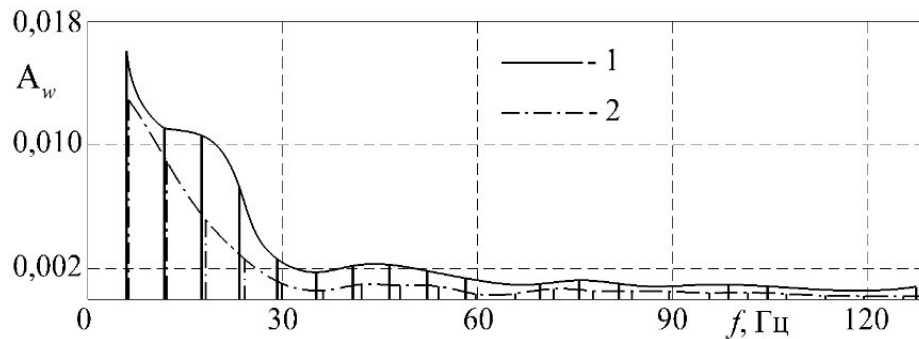


Рис. 1. График амплитуд спектра скорости потока воздуха w_x во впускной системе двигателя с наддувом (1) и без него (2)

ЛИТЕРАТУРА

1. Драганов Б.Х., Круглов М.Г., Обухова В.С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. Киев: Вища шк. 1987. 175 с.
2. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill. 1988. 546 p.
3. Абросимова М.В., Жолобов Л.А., Шелякин И.Н. Сравнительные испытания штатной и модернизированной впускных систем двигателя в режиме прокрутки / Вестник Чувашской гос. сельскохозяйственной академии, 2017. № 1 (1). С. 43-50.
4. Жолобов Л., Суворов Е. Аэродинамические исследования впускной системы бензинового двигателя / Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 4.
5. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. The gas-dynamic unsteadiness effects on heat transfer in the intake and exhaust systems of piston internal combustion engines // Int. J. Heat Mass Transfer, 2017. V. 115. P. 1182-1191.

L.V. Plotnikov, N.S. Kochev, M.O. Misnik
Ural Federal University

SPECTRAL ANALYSIS OF GAS-DYNAMIC PROCESSES IN THE INTAKE SYSTEM OF A SUPERCHARGED PISTON ENGINE

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СЛОЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА НИЖНЕЙ
КРЫШКЕ ТЕРМОСИФОНА**

Термосифоны представляют собой автономные теплопередающие устройства, способные без перекачивающих средств и сложной капиллярной структуры охлаждать тепловыделяющие части оборудования различных областей энергетики [1-2]. Развитие фундаментальных основ процессов теплопереноса в термосифонах сдерживается из-за отсутствия экспериментальных данных, позволяющих проводить прогностическую оценку температурных и скоростных полей при варьировании плотности теплового потока, степени заполнения испарительной части и других факторов.

Целью работы являлось экспериментальная оценка скоростей термогравитационной конвекции в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона.

Для экспериментальной оценки скоростей термогравитационной конвекции в слое теплоносителя использовалась кювета, имитирующая нижнюю крышку термосифона. Теплоноситель – дистиллированная вода с трассерами Fe_2O_3 . Диапазон варьирования толщины (h) слоя теплоносителя определялся диапазоном варьирования степеней заполнения испарительной части термосифона в экспериментах [3].

По результатам экспериментальных исследований установлены зависимости (рис. 1) средних по толщине скоростей (V) термогравитационной конвекции в слое воды от плотности теплового потока (q). Анализ результатов позволяет сделать вывод, что с ростом толщины слоя теплоносителя от 3.2 до 7.4 мм в диапазоне тепловых потоков от 42 до 1272 Вт/м² скорость термогравитационной конвекции увеличивается от 0.015 до 0.7 мм/с.

При толщинах слоя 3.2 и 5.3 мм в исследуемом диапазоне тепловых потоков скорость V не превышала 0.3 мм/с (рис. 1). При больших толщинах слоя ($h > 5.5$ мм) увеличение теплового потока от 42 до 1272 Вт/м² приводило к более интенсивному росту скорости термогравитационной конвекции. Можно сделать вывод, что в этом случае силы инерции отдельных молекул жидкости существенно превышают силы сопротивления слоя теплоносителя. Эти молекулы жидкости за счет термогравитационной конвекции успевают развить большую (примерно в

^(*) К.О. Пономарев, kop.tpu@gmail.com

2-3 раза по сравнению с меньшими толщинами слоя, $h=3.2-5.3$ мм) скорость до момента достижения ими поверхности раздела фаз.

В результате экспериментов получены зависимости средних по толщине слоя теплоносителя скоростей термогравитационной конвекции, анализ которых показал, что в диапазоне тепловых потоков от 42 до 1272 Вт/м² с ростом толщины h от 3.2 до 7.4 мм скорость V может увеличиться почти в 5 раз (до 0.7 мм/с).

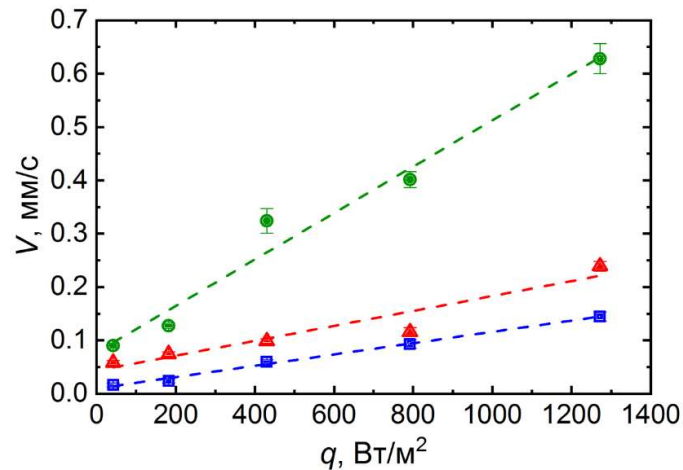


Рис. 1. Зависимости средних по толщине слоя скоростей термогравитационной конвекции. Толщина слоя теплоносителя, h : ■ – 3.2 мм; ▲ – 5.3 мм; ● – 7.4 мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Jafari D., Di Marco P., Filippeschi S., Franco A. An experimental investigation on the evaporation and condensation heat transfer of two-phase closed thermosyphons // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2017. V. 88. P. 111-123.
2. Bezrodny M.K., Piro I.L., Kostyuk T.O. Transfer processes in two-phase thermosyphon systems. Theory and practice. Kiev: Fact, 2005. 704 p.
3. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Пономарев К.О. Влияние степени заполнения термосифона на перепад температуры по высоте парового канала // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах, Москва, МЭИ, 2018. Т. 2. С. 78-81.

K.O. Ponomarev, G.V. Kuznetsov
National Research Tomsk Polytechnic University

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE COOLANT LAYER ON THE BOTTOM COVER OF THE THERMOSYPHON

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ КЕРОСИНА

Разработана математическая модель горения аэрозоля керосина. Модель основана на уравнениях динамики двухфазных реагирующих сред и состоит из уравнений энергии газа и капель с учетом теплообмена, испарения и тепловыделения от реакции паров керосина с кислородом воздуха; уравнений сохранения массы газа, капель, кислорода и керосина с учетом массообмена между фазами и выгорания реагентов; уравнения движения капель; уравнения для числа капель в единице объема; уравнения состояния идеального газа. Модель основана на моделях, изложенных в [1, 2]. Скорость химической реакции между парами керосина и кислородом описывается законом Аррениуса со вторым порядком реакции. Модель записана для изобарических условий горения аэрозоля.

Решается задача об определении нормальной скорости распространения фронта пламени в аэрозоли керосина. Предполагается, что в трубке большого диаметра и длины с закрытым торцом слева и открытым справа находится аэрозоль керосина. Распределение начальной массовой концентрации капель керосина в воздухе равномерное. На правом, открытом, торце трубки расположен высокотемпературный очаг зажигания (область повышенной температуры), который воспламеняет аэрозоль. После воспламенения по аэрозолю начинает распространяться волна горения. Ставится задача определить зависимость скорости распространения волны горения относительно стенок трубки от массовой концентрации капель керосина и начальной температуры аэрозоля.

Система уравнений математической модели решается численно. Численное исследование горения аэрозоля керосина проводилось для начальной массовой концентрации капель керосина равной стехиометрическому значению и ниже. Начальная температура аэрозоля варьировалась в интервале $T_0 = 293 \div 413 \text{ K}$, при атмосферном давлении и размере капель $r_{k,0} = 0.01 \text{ мм}$.

Вначале было проведено согласование результатов расчетов с экспериментальными данными о скорости горения аэрозоля керосина. Экспериментальные данные о зависимости скорости горения аэрозоля керосина от начальной температуры при стехиометрическом соотношении воздуха и керосина и зависимости от массовой концентрации керосина в воздухе при

(*) А.Ю. Крайнов, E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

начальной температуре 20 °С приведены в [3]. Согласование результатов расчетов с экспериментальными данными проводилось путем подбора величины предэкспоненциального множителя в законе Аррениуса для скорости химической реакции керосина с кислородом воздуха, при которой скорость распространения пламени совпадает с экспериментальным значением при коэффициенте избытка горючего 0.95 при температуре 40 °С.

Получены распределения температуры газа, температуры капель керосина, скорости газа, размера капель, плотности газа, парциальной плотности кислорода, распределенной плотности капель керосина, парциальной плотности паров керосина в волне горения при стационарном ее распространении. Проведены расчеты скорости распространения фронта горения в зависимости от начальной температуры аэрозоля при стехиометрическом соотношении керосина и воздуха, и в зависимости от массовой концентрации керосина при начальной температуре 20 °С. Получено хорошее согласие результатов расчетов по математической модели с экспериментальными данными [3].

Разработанная модель может быть распространена на горение аэрозолей других горючих жидкостей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьев А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газозвеси с экспериментальными данными// Инженерно-физический журнал, 2016. Т.89, №6. С. 1538 – 1546.
2. Козлов Е.А., Крайнов А.Ю. Период самовоспламенения двухкомпонентной аэрозоли жидких окислителя и горючего //Физика горения и взрыва, 1999. Т.35, № 6. С. 15-21.
3. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М. Наука, 1965. 740 с.

V.A. Poryazov¹, K.M. Moiseeva¹, A.Yu. Krainov¹, D.A. Krainov²
¹National Research Tomsk State University,
²National Research Tomsk Polytechnic University

MATHEMATICAL MODEL AND CALCULATION RESULTS OF KEROSIN AEROSOL COMBUSTION RATE

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ
ЦЕНТРАЛИЗОВАННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ
СИСТЕМ С АКТИВНЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ**

Внедрение технологий интегрированной и интеллектуальной энергетики (Smart Grid) позволит значительно повысить эффективность, экономичность и надежность энергетической отрасли. На сегодняшний день проблемы создания таких энергосистем, в частности, систем теплоснабжения 4-го поколения (4GDH), являются предметом большого числа исследований, достаточно широкий обзор которых приведен в статье [1]. В этой научно-технической области исследований одним из ключевых перспективных направлений является так называемый активный потребитель (АП, англ. – prosumer) с собственными энергоисточниками и/или аккумуляторами энергии, оптимально регулирующий график своего потребления с целью повышения эффективности и надежности как собственного энергоснабжения, так и всей энергосистемы [2, 3].

Настоящая работа посвящена вопросам обеспечения надежности теплоснабжающих систем (ТСС) с АП, имеющими собственные источники тепловой энергии (ИТ) и подключенными к общей централизованной тепловой сети (ТС). В таких централизованно-распределенных ТСС задача оптимизации надежности теплоснабжения потребителей формулируется как поиск такого распределения параметров надежности (интенсивностей отказов и восстановлений) по элементам системы, которое соответствует минимальному объему затрат на достижение этих параметров при обеспечении заданного требуемого уровня узловых показателей надежности (ПН) с учетом резервных функций АП в рамках допустимых теплогидравлических режимов в ТС и технически возможных диапазонов значений параметров надежности элементов.

Решение поставленной задачи осуществляется с помощью разработанной оптимизационной методики, в которой используются различные математические модели. Так, требуемый уровень надежности задается двумя узловыми ПН – коэффициентом готовности и вероятностью безотказной работы; эволюция событий в системе описывается моделью марковского случайного процесса; аварийные теплогидравлические режимы в ТС описываются моделями теории гидравлических цепей (ТГЦ); функции АП описываются с помощью укрупненной модели теплофизических процессов остывания воздуха с учетом как активного резерва по тепловой мощности собственных ИТ, так и пассивного, связанного с теплоаккумулирующим эффектом.

^(*) И.В. Постников, postnikov@isem.irk.ru

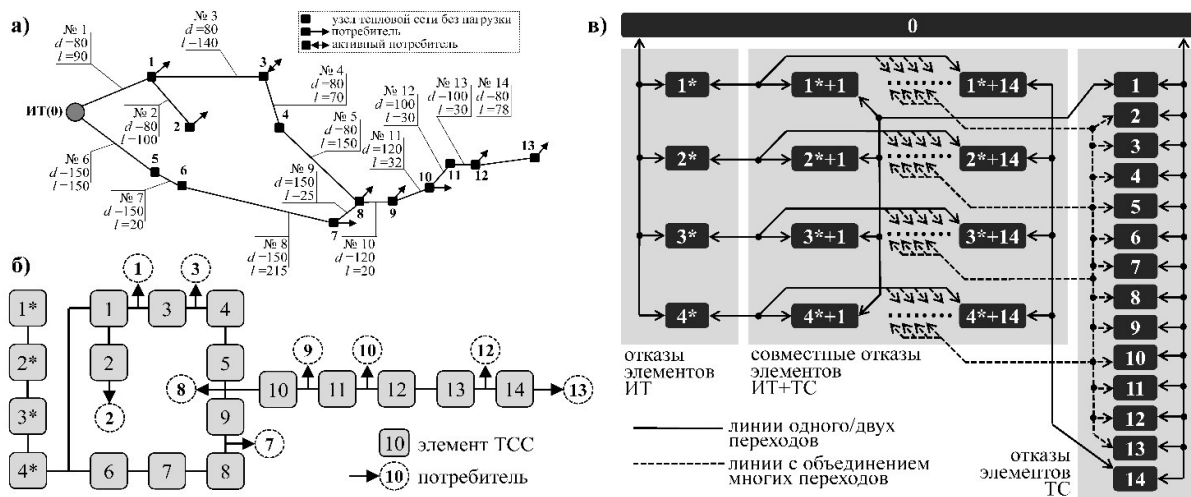


Рис. 1. Тестовый пример для апробации разработанного методического обеспечения для оптимизации надежности централизованно-распределенных ТСС с учетом функций АП: а) исходная схем ТСС (потребитель 3 – активный); б) расчетная надежность схема ТСС; в) граф состояний и переходов между ними для рассматриваемой системы

Предлагаемый методический подход заключается в определении интегральных параметров надежности, которые в соответствии с принципом сохранения вероятностей состояний оптимально распределяются по элементам системы. Для взаимоувязки расчетных этапов разработанной методики предложен соответствующий алгоритм, включающий два основных блока анализа и синтеза надежности. С использованием предложенных методических разработок проведен вычислительный эксперимент на тестовой укрупненной схеме ТСС с АП, некоторые этапы которого проиллюстрированы на рис. 1.

Работа выполнена в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН при поддержке Российского научного фонда (грант №17-19-01209).

ЛИТЕРАТУРА

1. Henrik Lund, Poul Alberg Østergaard, David Connolly, Brian Vad Mathiesen. Smart energy and smart energy systems // Energy, 2017, V. 137, P. 556–565.
2. Hongming Yang, Tonglin Xiong, Jing Qiu et al. Optimal operation of DES/CCHP based regional multi-energy prosumer with demand response // Applied Energy, 2016, V. 167, P. 353–365.
3. Lisa Brange, Jessica Englund, Patrick Lauenburg. Prosumers in district heating networks – A Swedish case study // Applied Energy, 2016, V. 164, P. 492–500.

I.V. Postnikov, V.A. Stennikov
Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Russia

METHODS AND MODELS FOR RELIABILITY OPTIMIZATION OF THE DISTRICT-DISTRIBUTED HEATING SYSTEMS WITH PROSUMERS

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ГИБРИДНЫХ
ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ТЭС И ВЭС**

Одной из основных проблем подключения ветровых электростанций (ВЭС) к электроэнергетическим системам (ЭЭС) является нестабильность потока ветровой энергии, что приводит к снижению качества и надежности электроснабжения потребителей. Частичное преодоление данной проблемы осуществляется различными методами и технологическими решениями (различные фильтро-компенсирующие устройства, преобразователи частоты, используемые на ВЭС с асинхронными генераторами; аккумулирующие устройства большой емкости; эксплуатация ВЭС в рамках активно развиваемой технологии Smart Grid и др.) [1–3]. Для преодоления указанных проблем, а также достижения дополнительных энергетических, экономических и экологических эффектов, авторами ранее было предложено альтернативное решение, суть которого, в отличие от традиционной схемы непосредственного подключения ВЭС в сеть ЭЭС, заключается в использовании электроэнергии ВЭС для прямого замещения топлива в циклах теплосиловых установок ТЭЦ. Подробное описание данной технологии, предлагаемых на ее основе гибридных энергоисточников, их технико-экономических показателей и достигаемых эффектов от применения технологии представлено в работах [4–6]. На данную технологию авторами получен патент [7].

Настоящая работа посвящена разработке методики и моделей анализа надежности предложенных ранее авторами схем гибридных энергоисточников на базе ВЭС и ТЭС с учетом согласования совместных режимов функционирования энергоустановок. Одной из особенностей функционирования рассматриваемых схем гибридных энергоисточников заключается в несогласованности графиков выработки электроэнергии на ВЭС, имеющих неопределенный характер, с графиками отпуска электрической и тепловой энергии на ТЭЦ, определяемых нагрузками потребителей. Другая особенность объекта исследований связана с тем, что он является сложной системой, состоящей из нескольких энергоустановок различного типа, отказы элементов которых могут происходить одновременно и независимо друг от друга. Таким образом, основная цель разработки методики анализа надежности гибридных энергоисточников на базе ВЭС и ТЭС заключается в получении научно обоснованных оценок показателей надежности (ПН) в отношении отпуска электрической и тепловой энергии с учетом различных режимов ветровой

^(*) И.В. Постников, postnikov@isem.irk.ru

активности и нагрузки потребителей при реализации различных аварийных состояний совместного отказа элементов различных подсистем (энергоустановок). Методология исследований основана на применении теории надежности технических систем, теории вероятностей и комбинаторики, аппарата марковских случайных процессов, математических методов аппроксимации функций, базовых ПН (вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, время нарушения расчетного энергоснабжения), методик расчета технических параметров режимов функционирования исследуемых энергоустановок и др.

Предлагаемый комплексный подход к исследованию надежности рассматриваемых гибридных энергоисточников позволяет в едином расчетном алгоритме обеспечить методологическую совместимость и логическую взаимосвязку используемых методов и моделей, учесть различные факторы, влияющие на их надежность и получить реалистичные оценки ПН, выявить наиболее ненадежные узлы и элементы системы, обеспечив переход к оптимизации исследуемых схем.

Исследование выполнено в рамках проекта III.17.4.1 № АААА-А17-117030310432-9 программы фундаментальных исследований СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.G. Slootweg and W.L. Kling. Is the answer blowing in the wind? // IEEE Power&Energy, 2003, V. 1(6), P. 26–33.
2. Ванзетта Й. Вопросы перехода энергосистемы от традиционной к системам распределенной генерации и/или электростанциям на ВИЭ // Энергетика за рубежом – приложение к журналу «Энергетик», 2016, №1, С. 2–14.
3. Меден Н.К. Интеграция возобновляемой энергетики. Опыт Германии // Энергия: экономика, техника, экология, 2004, №4, С. 2–8.
4. Ivan Postnikov, Valery Stennikov, Andrey Penkovskii. Integrated Energy Supply Schemes on Basis of Cogeneration Plants and Wind Power Plants // Energy Procedia, 2019, V. 158, P. 154–159.
5. Стенников В.А., Жарков С.В., Постников И.В., Пеньковский А.В. Интегрированные схемы энергоснабжения на базе ТЭЦ и ВЭС // Промышленная энергетика, 2016, №11, С. 57–62.
6. Жарков С.В., Стенников В.А., Постников И.В., Пеньковский А.В. Технология комбинированной генерации энергии тепловыми и ветровыми электростанциями // Энергобезопасность и энергосбережение, 2017, № 3, С. 8–14.
7. Жарков С.В., Кейко А.В., Постников И.В., Пеньковский А.В. Способ работы паротурбинной установки. Патент №2557049, зарегистрирован 20.07.2015.

I.V. Postnikov, V.A. Stennikov, A.V. Penkovskii
Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Russia

RELIABILITY STUDY OF THE HYBRID ENERGY SOURCES BASED ON WIND AND COMBINED HEAT POWER PLANTS

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕРТНОЙ ТОПКИ КОТЛА НА УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

Повышение параметров пара пылеугольных блоков от сверхкритических до ультрасверхкритических (УСКП - $p_0 = 30$ МПа и $t_0 = 700^\circ\text{C}$) позволяет увеличить КПД блока на 4.2% [1]. Применение УСКП пара приводит к необходимости применения в качестве металла для пароперегревателей и паропроводов никелевых сплавов, стоимость которых на порядок больше стоимости сталей, применяющихся при строительстве котлов на сверхкритические параметры в настоящее время. В общей структуре стоимости энергоблока с УСКП затраты на паропроводы составляют около 20%, поэтому главной задачей при проектировании котлов на УСКП является разработка конструкции котла с минимально возможной длиной паропроводов. Кафедрой ТЭС НИУ «МЭИ» предложена концепция котла 1000 МВт М-образной компоновки с инвертной топкой и расположением выходных коллекторов под наклонными газоходами [2].

Для проведения экспериментальных исследований с целью получения информации об эффективности предложенной конструкции топочной камеры и изучения внутритопочной аэродинамики котла УСКП М-образного профиля, разработана физическая модель топки, эскиз которой приведен на рис. 1. Метод проведения исследований - изотермическое моделирование аэродинамики топочного объема, которое основывается на обеспечении равенства отношений динамических напоров струй на выходе из прямооточных каналов (горелочных устройств, сопел вторичного и третичного воздуха, сбросных сопел сушильного агента и т.д.) и потока топочных газов на уровне их расположения в модельном образце и реальном котле [3]. Тяга внутри физической модели осуществляется с помощью радиального вентилятора. Для определения траекторий движения струй, прокаленные опилки по очереди подносятся к различным каналам, и их светящиеся траектории фиксируются на фотокамеру. Стенд позволяет определять траектории струй, местоположение ядра факела, доли сгорания топлива по зонам топочной камеры, проводить исследования взаимодействия струй в объеме топки, определять границы струй с помощью электроподогрева потока, истекающего из горелки.

Физическое моделирование внутритопочной аэродинамики применяется во многих подобных работах на кафедре ТЭС НИУ «МЭИ» и его результаты, с учетом особенностей и допущений метода, имеют адекватную сходимость с

^(*) Н.Е. Фоменко, fomenko.n.e@yandex.ru

результатами численного моделирования процессов в топочных камерах. Подход физического универсальный и может быть использован для исследования инвертной топки котла мощностью 500 МВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект № 16-19-10463 от 12 мая 2016 года.

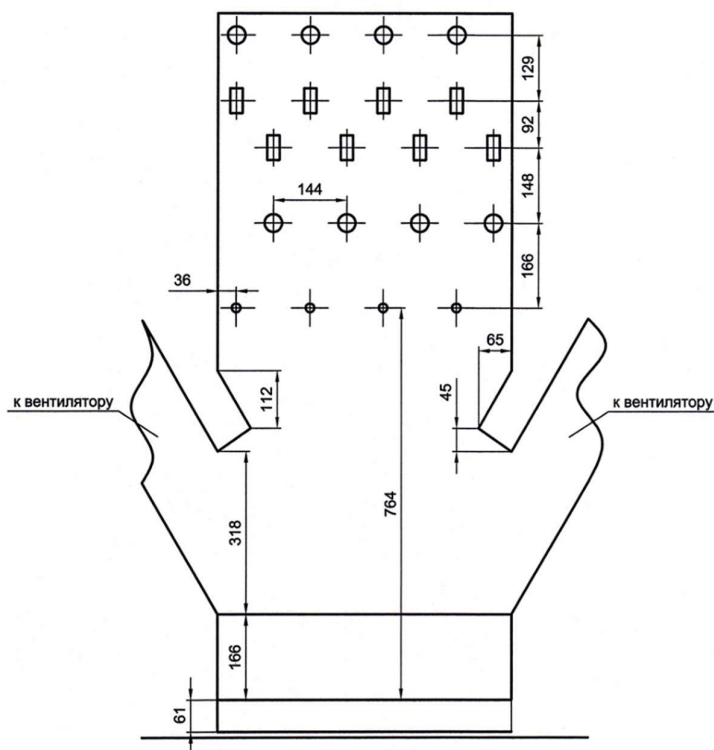


Рис. 1. Поперечный разрез физической модели топки котла УСКП М-образного профиля

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Г. Тумановский, А.Л. Шварц, Е.В. Сомова, Э.Х. Вербовецкий, Г.Д. Авруцкий, С.В. Ермакова, Р.Н. Калугин, М.В. Лазарев Пылеугольные энергоблоки на супер- и ультрасверхкритические параметры пара (обзор) М: Теплоэнергетика, 2017, №2, с. 3-19
2. Prokhorov V.B., Chernov S.L., Kirichkov V.S. Development of M-shaped boiler for ultra-supercritical steam parameters for 1000 MW power unit// International Journal of Applied Engineering Research 2016. – Т. 12. – №. 8. – С. 1511-1519.
3. Kirichkov VS, Arkhipov AM, Prokhorov VB 2017 Model of the Aerodynamics of a Direct-Flow-Vortex flame as Applied to a TGMP-314 boiler, Therm. Eng. 6 (60) 402-408.

V.B. Prokhorov, S.L. Chernov, V.S. Kirichkov, N.E. Fomenko
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

DEVELOPMENT AND MODELING OF INVERT BOILER FURNACE FOR A-USC STEAM PARAMETERS

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУСПЕНЗИЙ С НАНОЧАСТИЦАМИ

Наносуспензии представляют собой двухфазную систему, состоящую из базовой жидкости (например, дистиллированная вода, этиленгликоль, масло) и наночастиц. Наносуспензии являются чрезвычайно перспективными материалами, они активно изучаются последние двадцать лет в связи с уже существующими или планируемыми многочисленными приложениями. Поскольку практически во всех случаях имеет место течение наножидкостей, то их характер будет определяться соответствующими теплофизическими свойствами. Исследованию этих свойств и в первую очередь теплопроводности и вязкости посвящено огромное число публикаций [см. обзоры 1-3]. Однако, электроакустическим параметрам, таким как спектр затухания сигнала, электрокинетический потенциал, скорость звука, уделено недостаточно внимания. Одним из наиболее перспективных направлений является определение связи между коэффициентом теплопроводности и скоростью звука суспензий. Первые попытки связать скорость звука с коэффициентом теплопроводности жидкостей были предприняты в 1923 году [4]. Однако дальнейших попыток практически не было.

В работе проведено измерение электроакустических характеристик при помощи акустического и электроакустического анализатора DT1202. Акустический метод анализатора основан на измерении степени ослабления ультразвукового сигнала и используется для определения размеров частиц, в том числе, в непрозрачных и концентрированных средах [5]. На основе спектра ослабленного сигнала и по скорости звука рассчитывается средний размер частиц и распределение частиц по размерам. Электроакустический спектральный анализ [5] основан на эффекте возникновения ультразвуковых (УЗ) волн при наложении переменного электрического поля на суспензию заряженных частиц, которые испытывают трение в процессе колебаний. Анализируя спектры УЗ волн, вычисляется коллоидный вибрационный ток (Colloid Vibration Current), а также гранулометрический состав, электрокинетический потенциал, реологические свойства коллоидной суспензии (в том числе вязкоупругий модуль сдвига M' и M'').

Электроакустические исследования наносуспензий были проведены на основе дистиллированной воды, этиленгликоля. В качестве наночастиц

(*) М.И. Пряжников, arrivent@yandex.ru

рассмотрены оксиды металлов и металлы. Наночастицы оксидов металлов были приобретены у компании «Плазмотерм», г. Москва, металлические частицы – у компании «Передовые порошковые технологии», г. Томск. Суспензии были приготовлены двух стадийным методом. Массовая концентрация наночастиц варьировалась в широком диапазоне, вплоть до 20%. Все измерения проведены при комнатной температуре.

Были измерены спектры затухания от частоты ультразвукового сигнала. Получены данные о скорости звука в суспензиях. Также измерялся электрокинетический потенциал, фиксировалась кислотность. Проведены измерения коэффициента теплопроводности, вязкости и реологии. Получены зависимости перечисленных выше параметров от концентрации частиц.

Участие во «Всероссийской научной конференции с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» проведено при поддержке Красноярского краевого фонда науки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hosseini S.Sh., Shahrjerdi A., Vazifeshenas Y. A review of relations for physical properties of nanofluids // *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, 2011. V. 5(10). P. 417.
2. Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A. Latest developments on the viscosity of nanofluids // *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2012. V. 55. P. 874.
3. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R. Rheological behaviour of nanofluids: A review // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2016. V. 53. P. 779.
4. Bridgman P. The thermal conductivity of liquids under pressure // *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, 1923. V. 59. 141.
5. Dukhin A.S. and Goetz P.J. Characterization of liquids, dispersions, emulsions, and porous materials using ultrasound, 3rd Edition. Elsevier, 2017.

M.I. Pryazhnikov^{1,2}, A.V. Minakov^{1,2}, V.A. Zhigarev¹

¹Siberian Federal University,

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

ELECTROACOUSTIC STUDY OF THE SUSPENSIONS WITH NANOPARTICLES

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ОХЛАДИТЕЛЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

В работе предложена математическая модель, описывающая рабочий процесс в газогенераторе, состоящем из последовательно расположенных заряда твердого топлива и заряда охладителя (твердого вещества, способного к эндотермическому разложению). Газогенераторы такого рода используются в системах пожаротушения, для раскрутки турбин и наддува емкостей различного назначения [1], и в настоящее время рассматриваются [2] в качестве источника горючих газов для перспективных высокоскоростных прямоточных воздушно-реактивных двигателей (рис. 1). Моделируется разложение структурированного заряда охладителя под воздействием протекающих через заряд продуктов сгорания топлива. Для описания газодинамики процесса используются одномерные уравнения сохранения массы, энергии, импульса и уравнения баланса компонентов газов. Моделирование ведется с учетом кинетики пиролиза охладителя и изменения формы.



Рис. 1. Принципиальная схема высокоскоростного прямоточного воздушно-реактивного двигателя с низкотемпературным газогенератором [3]

Рассмотрим газификацию зарядов полиметилметакрилата (РММА), полиэтилена (РЕ) и полибутадиена с концевыми гидроксильными группами (НТРВ), выполненных в виде 76 цилиндрических стержней с радиусами 2 мм, расположенных вдоль цилиндрического канала газогенератора длиной 0,2 м и радиусом 0,02 м. На рис 2. изображены зависимости расхода охладителя и в выходном сечении заряда от времени, при течении через заряды газообразных продуктов горения твердого топлива с температурой 2200 К, статическим давлением 5 МПа и массовым током 5 г/с.

^(*) А.В. Размыслов, sanaraz@mail.ru

Можно увидеть, что во всех случаях продолжительное время после начала работы газогенератора расход охладителя меняется незначительно, а в последние секунды работы расход резко падает. Это связано с тем, что, как показано основной вклад в расход охладителя и поглощение внутренней энергии потока вносит газификация в "активной зоне" за входным сечением заряда. Если длина этой зоны гораздо меньше длины заряда, то большую часть работы газогенератора выделение газов и падение температуры в ней остаются неизменными. Резкое падение расхода и рост температуры в выходном сечении наблюдается, когда активная зона достигает выходного сечения заряда. Можно также заметить, что температура газов в выходном сечении заряда охладителя во всех случаях достигает значений менее 700 К, что позволяет [3] использовать такие газы для охлаждения камеры сгорания высокоскоростного прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

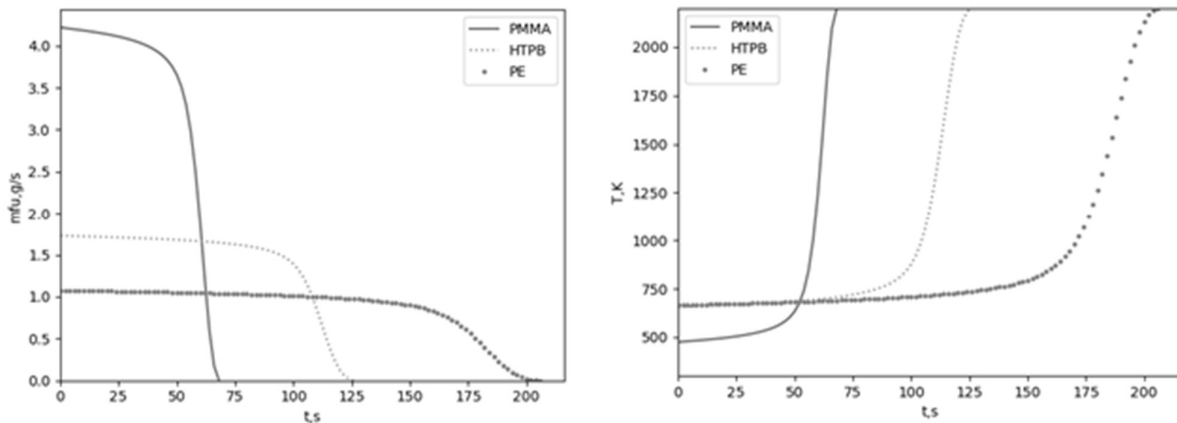


Рис. 2. Зависимости массового расхода охладителя и температуры в выходном сечении зарядов различных охладителей от времени

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirillov V.V., Shelkhovskoi R.D. Heat and Mass Transfer in Low-Temperature Gas Generation // *Procedia Engineering*, 2017. V. 206. P. 242.
2. Salgansky E.A., Lutsenko N.A., Levin V.A., Yanovskiy L.S. Modeling of solid fuel gasification in combined charge of low-temperature gas generator for high-speed ramjet engine // *Aerospace Science and Technology*, 2018. V. 84 P. 31.
3. Volokhov V. et al. Supercomputer Simulation of Physicochemical Processes in Solid Fuel Ramjet Design Components for Hypersonic Flying Vehicle// *Communications in Computer and Information Science*. — Springer International Publishing, 2016. P. 236.

A.V. Razmyslov, V.G. Sultanov
 Institute of Problems of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences

NUMERICAL MODELING OF REFRIGERANT GASIFICATION IN A LOW-TEMPERATURE GAS GENERATOR

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННИКОВ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Теплообменные аппараты, применяемые в системах теплоснабжения, обычно работают в условиях переменных расходов и температур теплоносителей. Вместе с тем теории для расчета переменных режимов работы таких аппаратов основаны на использовании постоянных параметров теплообменников. Например, для водо-водяных теплообменников

$$\Phi_0 = (kF)_c / (W_{pc} W_{hc})^{0,5} \quad (1)$$

Где $(kF)_c$, Вт/К – произведение коэффициента теплопередачи теплообменника на его площадь, определяемое при конструктивном расчете, при эквивалентах расходов первичного W_{pc} и вторичного W_{hc} теплоносителей, Вт/К.

В нашей работе [1] показано, что на параметр теплообменника Φ могут влиять все величины, определяющие изменение коэффициента теплопередачи. Для определения переменных параметров теплообменников в зависимости от их конструкции, широко применяются формулы, полученные Н.М. Зингером

$$\Phi_{sp} = \frac{\Phi}{l} = 0,264 / \left\{ w_{its}^{0,2} \left[0,856 (w_{ts} / w_{its})^{0,5} + (w_{its} / w_{ts})^{0,3} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\Phi_{sp} = 0,14 \varphi (f_{its} / f_{ts})^{-0,6} (1 + 0,003 t_{its}^m) (1 + 0,008 t_{ts}^m) \quad (3)$$

где l – длина трубок; w_{ts} , w_{its} , t_{ts}^m и t_{its}^m – скорости и средние температуры теплоносителей в трубках и межтрубном пространстве; φ – коэффициент загрязнения; f_{its} и f_{ts} – площади межтрубного и трубного пространства.

Н.Н. Чистяков предложил изменение параметров подогревателей системы горячего водоснабжения I и II ступеней находить по эмпирическим формулам:

$$\Phi^I = \Phi_0 (0,615 + 0,385 t_s) \quad (4)$$

$$\Phi^{II} = \Phi_0 (0,565 + 0,435 t_s) \quad (5)$$

где t_s – отношение средних температур воды в переменном режиме.

В [1] приведены методика и некоторые результаты моделирования теплообменников в переменных режимах работы. Цель данного доклада состоит в выводе и верификации формул, описывающих переменный параметр теплообменника. В частности, показано, что при работе тепловой сети по графику 150/70°C со срезками 114°C и 70°C, для I и II ступеней подогревателей

(*) Т.А. Рафальская, rafalskaya.ta@yandex.ru

горячего водоснабжения при неизвестных температурах теплоносителей получается формула:

$$\Phi(Q) = Q / \left[\Delta t_c (W_p W_h)^{0,5} \right] \left\{ \left[(W_p / W_h)^{a_1} \frac{Q_c}{Q} + b_1 - c_1 \right] + \frac{Q_c}{Q} \left[(W_p W_h) / (W_{pc} W_{hc}) \right]^{0,5} \right\} \quad (6)$$

где для I ступени: $a_1=0,2$; $b_1=0$; $c_1=0,4$; для II ступени: $a_1=0,02$; $b_1=0,03$; $c_1=1$.

В случае если неизвестны расходы теплоносителей, получено следующее соотношение

$$\Phi(Q) = Q / \left[\Delta t (W_{pc} W_{hc})^{0,5} \right] \left[a_2 (Q_c / Q)^{b_2} - c_2 \right] + d_2 \quad (7)$$

где для I ст.: $a_2=2,3$; $b_2=-0,2$; $c_2=1$; $d_2=0$; для II ст.: $a_2=1,6$; $b_2=0,05$; $c_2=1,14$; $d_2=0,57$.

Изменение параметров теплообменников горячего водоснабжения I и II ступеней показано на рис. 1 в сравнении с расчетом по формулам (2)–(5).

Формулы (2)–(5) не всегда могут применяться для расчета переменных режимов, соотношения (2) и (3) не коррелируют между собой. Полученные формулы (6) и (7) могут применяться для настройки программируемых регуляторов.

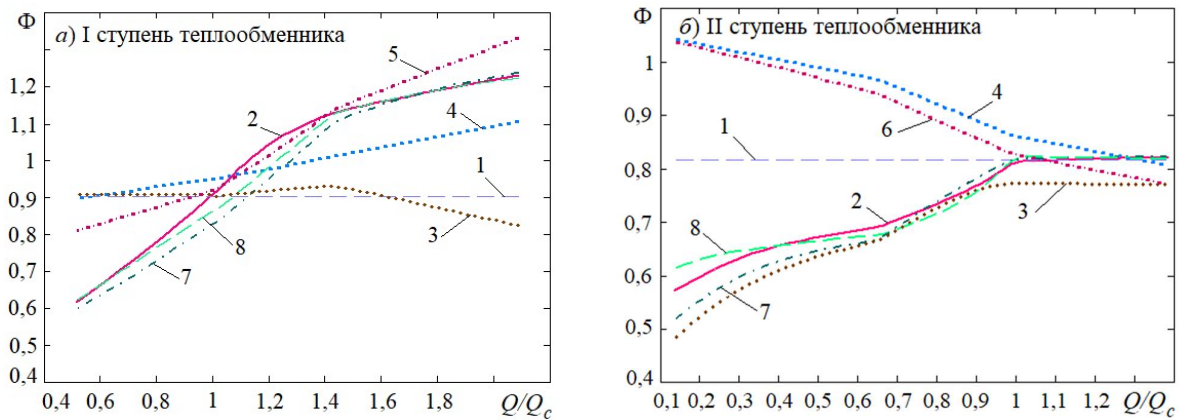


Рис. 1. Переменные параметры теплообменников горячего водоснабжения
 1 – Постоянный параметр по формуле (1); 2 – численное моделирование по [1];
 3 – по формуле (2); 4 – по формуле (3); 5 – по формуле (4); 6 – по формуле (5);
 7 – по формуле (6); 8 – по формуле (7)

ЛИТЕРАТУРА

1. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. О применимости соотношений с постоянными параметрами для расчета переменных режимов теплообменных аппаратов // Известия вузов. Строительство, 2018. № 8. С. 91-107.

T.A. Rafalskaya¹, V.Ya. Rudyak^{1, 2}

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,

²Novosibirsk State University

MODELING OF CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGERS OF HEAT SUPPLY SYSTEMS IN VARIABLE OPERATING MODES

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТОПИТЕЛЬНОГО КОНВЕКТОРА

В последнее время особое внимание уделяется вопросу использования в системах отопления низкотемпературных теплоносителей [1], полученных в конденсационных котлах, либо при утилизации теплоты побочных продуктов различных технологических процессов в промышленности. Активно рассматривается вопрос использования отопительных конвекторов для данных систем, которые уже имеют широкое применение, как в жилых зданиях, так и на объектах социально назначения. Важной задачей при проектировании конвекторов является снижение их металлоемкости, и, следовательно, экономии топливно-энергетических ресурсов на производство металла, идущего на их изготовление.

Отопительный конвектор представляет собой одну или две несущих трубки с оребрением в виде плоских пластин, теплота от которых отводится естественной конвекцией, и, в меньшей мере, излучением. В последнее время появилось много работ посвященных теплообмену на оребренных поверхностях, например, [2].

Целью данного исследования было определить, как влияет температура теплоносителя, протекающего в конвекторе на передаваемый тепловой поток, и оказывает ли она влияние на его оптимальные геометрические параметры. В качестве целевой функции выбрано отношение передаваемой конвектором теплоты к его массе (Q/m). В общем случае на целевую функцию накладывается дополнительное условие: тепловой поток с единицы длины конвектора должен быть не меньше значения, задаваемого потребителем.

Ранее авторами была разработана математическая модель конвектора [3], в которой учитывались конвективная и лучистая составляющие теплового потока. Учет уменьшения коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене при сокращении расстояния между ребрами проводился с использованием формулы Эленбааса. При расчетах принято, что температура основания ребра равна температуре теплоносителя. Рассчитывался конвектор с несущей трубкой, на которой устанавливались квадратные ребра. При этом варьировались расстояния между ребрами (1-15 мм), их толщина (1-10 мм) и высота (10-50 мм).

Проведенные расчеты (рис. 1) показали, что при рассматриваемых параметрах вклад излучения в общий тепловой поток составил 20-21%.

^(*) Е.С. Рекуненко, ekaterina_rekunenko@mail.ru

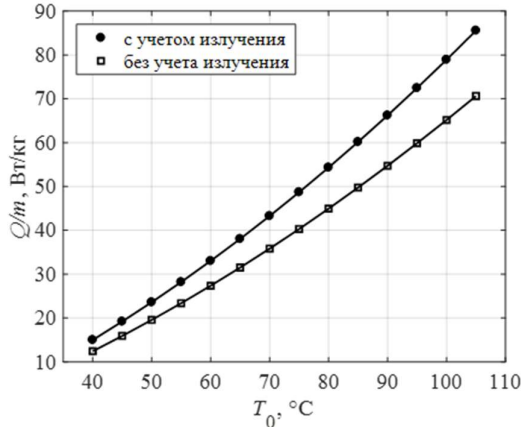


Рис. 1. Зависимость целевой функции (Q/m) от температуры теплоносителя (T_0)

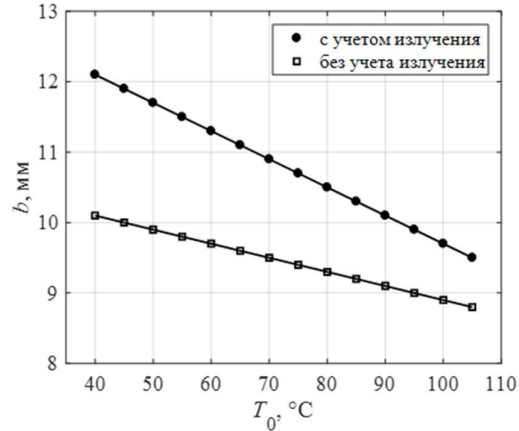


Рис. 2. Зависимость оптимального расстояния между пластинами (b) от температуры теплоносителя (T_0)

При снижении температуры теплоносителя максимум целевой функции наблюдается при больших расстояниях между ребрами (рис. 2). Это можно объяснить ростом толщины пограничных слоев, образующихся на поверхностях ребер, при низких температурах. Вследствие этого при малых расстояниях между ребрами с более низкой температурой происходит более существенное снижение теплоотдачи от их поверхности к воздуху. Таким образом, при применении в системах отопления теплоносителей с низкими температурами, целесообразно устанавливать пластины оребрения на большем расстоянии друг от друга.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Lund et al. 4th Generation District Heating (4GDH) integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. – Energy, 2014. 68, p.1-11.
2. Haw-Tan Chen, Wei-Lun Hsu. Estimation of heat transfer coefficient on the fin of annual-finned tube heat exchangers in natural convection for various fin spacing. - Heat and Mass Transfer, 2007. 50, p. 1750-1761.
3. Е.С. Рекуненко, С.А. Емельянов, А.Б. Гаряев. Метод оптимизации параметров радиаторов с квадратными и круглыми ребрами. // Энергосбережение – теория и практика: Труды девятой международной школы-семинара молодых учёных и специалистов – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 126-130.

E.S. Rekunenko, A.B. Garyaev
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

HEAT CARRYING FLUID TEMPERATURE INFLUENCE ON THE HEATING CONVECTOR OPTIMAL CHARACTERISTICS

КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА НАНОЖИДКОСТЕЙ В ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Интенсификация работы теплообменных устройств в ряде случаев является критическим фактором, определяющим дальнейшее развитие соответствующих систем. Такая ситуация, например, имеет место при разработке процессоров современных компьютеров, в различных МЭМС и т.д. В последние два десятилетия активно обсуждается возможность использования в качестве эффективного теплоносителя наножидкостей. Связано это с их высокой теплопроводностью, отсутствием седиментации наночастиц и некоторыми другими обстоятельствами. Изучению теплообменных свойств наножидкостей посвящено огромное число публикаций. Однако полученные экспериментальные данные весьма противоречивы. Ряд противоречий удалось снять, показав, что характеристики теплообмена, прежде всего, определяются тем, является ли течение ламинарным или турбулентным. Установлено, что в ламинарном течении коэффициент теплоотдачи наножидкости всегда превышает его значения для базовой жидкости, но относительно степени этого превышения данные также достаточно неоднозначные. Не ясно, какими параметрами наножидкости это превышение определяется. Можно ли его предсказать при использовании той или иной наножидкости. Наконец, все еще практически отсутствуют работы, в которых моделирование течений наножидкостей выполняется с учетом их реальных теплофизических данных.

Цель данной работы и состоит в изучении теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале в ламинарном режиме. Исследуется теплообмен наножидкостей на основе воды с частицами TiO_2 (100 нм), ZrO_2 (105 нм), Al_2O_3 (100, 150 нм), CuO (55 нм). Их объемная концентрация варьировалась от 0 до 6%. Во всех случаях измерялись коэффициенты теплоотдачи, вязкости и теплопроводности. Гидродинамическое моделирование осуществлялось в рамках одножидкостной гидродинамики, однако термодиффузия наночастиц учитывалась. При моделировании использовались актуальные теплофизические данные рассматриваемых наножидкостей.

Показано, что наножидкости могут иметь как ньютоновскую, так и неньютоновскую реологию. Установлено, что использование наножидкостей во всех случаях увеличивает коэффициент теплоотдачи по сравнению с

(*) В.Я. Рудяк, valery.rudyak@mail.ru

соответствующим значением базовой жидкости. Превышение зависит и от свойств базового флюида и от теплофизических свойств используемой наножидкости, ее реологии. С одной стороны, оно будет тем выше, чем ниже коэффициент теплопроводности базового флюида. С другой, теплоотдача наножидкости зависит от концентрации частиц, их размера и материала. При сравнительно небольших концентрациях (до 5–8%) превышение относительного коэффициента теплоотдачи растет практически линейно с концентрацией частиц. Линейной оказывается и зависимость приведенного среднего коэффициента теплоотдачи от относительного коэффициента теплопроводности при разных значениях концентрации частиц.

Моделирование данных течений позволило: (i) изучить их характеристики в диапазоне параметров экспериментально не изученном, (ii) получить данные о теплообмене наножидкостей экспериментально не изучавшихся, (iii) выявить особенности влияния термодиффузии наночастиц. Показано, что наличие термодиффузии приводит к существенному уменьшению концентрации наночастиц вблизи стенок канала, в результате чего уменьшается локальная вязкость у стенок канала и увеличивается скорость потока. В результате теплообмен за счет эффекта термодиффузии интенсифицируется. Однако вклад этих эффектов в различные характеристики течения в общем не велик (порядка процентов), хотя и растет с увеличением концентрации частиц.

Говоря об эффективности использования наножидкости для охлаждения, всегда следует учитывать и затрачиваемую для ее прокачки мощность. С этой целью в данной работе систематически измерялось и рассчитывалось падение давления в канале. Поскольку коэффициент сопротивления пропорционален вязкости, а она существенно превышает вязкость базового флюида, то ясно, что гидравлическое сопротивление наножидкостей оказывается значительно выше, чем у базового флюида. Приятным фактором является, однако, то, что коэффициент теплопроводности наножидкости растет с увеличением размера частиц (а значит и коэффициент теплоотдачи), тогда как коэффициент вязкости с ростом размера частиц напротив падает. Поэтому и с точки зрения энергетических затрат всегда можно найти некоторый оптимум.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 17-01-00040, № 17-58-45023) и РНФ (проект № 17-79-20218).

V.Ya. Rudyak^{1,2,3}, A.V. Minakov³, D.V. Guzei³, A.S. Lobasov³
¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
²Novosibirsk State University,
³Siberian Federal University

CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF NANOFLUIDS IN LAMINAR MODE. EXPERIMENT AND MODELING

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА СООТНОШЕНИЯХ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И МАСШТАБНОЙ ГИПОТЕЗЕ

При поиске параметров и коэффициентов единых фундаментальных уравнения состояния (ЕФУС), которые качественно верно, то есть в соответствии с масштабной гипотезой описывают окрестность критической точки, обычно используется массив экспериментальной информации $M(p, \rho, T, C_V, \dots)$, в который входят данные об изохорной теплоемкости C_V . Однако для новых перспективных рабочих веществ, используемых в энергетике, данные о C_V в окрестности критической точки отсутствуют. Мы предлагаем метод построения ЕФУС, который позволяет исключить из массива M данных о C_V без существенного роста неопределенности расчета термических и калорических свойств в окрестности критической точки.

Суть метода заключается в следующем. Мы представили ЕФУС, в соответствии с [1], в виде выражения для свободной энергии Гельмгольца F :

$$F(\rho, T) = F^{(reg)}(\rho, T) + \phi(\omega, t) \cdot F^{(nreg)}(\rho, T) \quad (1)$$

где $\phi(\omega, t)$ – кроссоверная функция.

Нерегулярную функцию $F^{(nreg)}$ представили в виде [2]:

$$F^{(nreg)}(\rho, T) = (p_c / \rho_c) |\Delta\rho|^{\delta+1} a(x) \quad (2)$$

Все параметры масштабной функции $a(x)$, кроме параметров a_0 и $k_0 = (1 - b^2)^\beta / x_0^\beta$, мы рассчитали на основе линейной модели Скофилда (ЛМ).

Для расчета параметра a_0 мы воспользовались результатами работы [3], в которой на основе ЛМ и преобразований Покровского (ПП) установлена следующая зависимость

$$k_0 a_0^{-1/\delta} = k_p a_p^{-1/\delta} \quad (3)$$

Здесь k_p и a_p – параметры реальной жидкости: $k_p = k_0 (1 - uv)^\beta$ и $a_p = a_0 (1 - uv)^{\beta\delta}$, где u и v – параметры ПП.

В работе [3] также установлена зависимость:

$$k_p u_p^{-1/\delta} = A + BZ_c \quad (4)$$

где Z_c – критическая сжимаемость.

^(*) С.В. Рыков, toggl@yandex.ru

Мы обработали данные о a_p и k_p , приведенные в работах [4–6] для ряда веществ, при значениях критического индекса $\delta = 4.80 \div 4.82$ и нашли коэффициенты зависимости (4). Из (3)–(4) при условии $u = 0$ непосредственно следует выражение для параметра a_0 : $a_0 \approx [k_0 / (A + BZ_c)]^\delta$.

Параметр x_0 может быть рассчитан на основе данных о плотности на линии насыщения исследуемого вещества. Данный метод мы апробировали на примере построения ЕФУС аргона, CO_2 и SF_6 . При этом мы исключали при поиске коэффициентов ЕФУС данные о C_V , относящиеся к широкой окрестности критической точки. Например, в случае аргона мы исключили из массива M все данные о C_V , приведенные в работах Анисимова и др. (1975, 1978 гг.) и Воронеля и др. (1964, 1965, 1966, 1973 гг.). Однако неопределенность расчетной информации о C_V и скорости звука, полученная на основе ЕФУС аргона, не превысила неопределенности экспериментальных данных Анисимова и др., Воронеля и др, Thoen et al (1971 г.). Мы подробно проанализировали результаты расчета термических и калорических свойств, полученных на основе ЕФУС аргона, CO_2 и SF_6 . Предложенную методику мы использовали при расчете равновесных свойств R32 и R236ea.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rykov V.A., Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Sverdlov A.V. Method of constructing a fundamental equation of state based on a scaling hypothesis // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 891. P. 012334.
2. Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Rykov S.V., Ustyuzhanin E.E. A new variant of a scaling hypothesis and a fundamental equation of state based on it // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 946. P. 012118.
3. Лысенков В.Ф., Рыков В.А. Связь параметров линейной модели решеточного газа и уравнения состояния реально жидкости // *ТВТ.* 1991. Т. 29. С. 1236–1238.
4. Sengers J.V., Levelt Sengers J.M.H. A Universal representation of the thermodynamic properties of fluids in the critical region // *Int. J. Thermophys.* 1984. V. 5. P. 195–208.
5. Albright P.C, Edwards T.J., Chen Z.Y., Sengers J.V. A scaled fundamental equation for the thermodynamic properties of carbon dioxide in the critical region // *J. Chem. Phys.* 1987. V. 87. P. 1717–1725.
6. Анисимов М.А., Киселев С.Б., Костюкова И.Г., Нагаев В.Б. Уравнение состояния и методика расчета термодинамических свойств этана и метана в критической области // *Теплофизические свойства веществ и материалов.* 1989. № 27. С. 6–20.

S.V. Rykov, I.V. Kudryavtseva, V.A. Rykov
ITMO University, Saint-Petersburg

A METHOD OF CONSTRUCTING FUNDAMENTAL EQUATIONS OF STATE BASED ON RELATIONS OF SIMILARITY THEORY AND SCALE HYPOTHESIS

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯМ МАСШТАБНОЙ ГИПОТЕЗЫ

В настоящее время для расчета равновесных свойств рабочих веществ все шире используются единые фундаментальные уравнения состояния (ЕФУС) [1-6], удовлетворяющие требованиям масштабной теории (МТ) критической точки. Подход, в рамках которого структура ЕФУС [4] задается в виде выражения свободной энергии Гельмгольца F :

$$F(\rho, T) = F^{(reg)}(\rho, T) + \phi \cdot F^{(nreg)}(\rho, T), \quad (1)$$

где $\phi = \phi_0(\omega)$, $\omega = \rho / \rho_c$, получил физическое обоснование в рамках нового представления масштабной гипотезы [5]. В общем случае, кроссоверная функция ϕ зависит и от температуры [6]: $\phi = \phi_0(\omega)\phi_1(t)$, $t = T / T_c$. Мы показали, что в отличие от фундаментальных уравнений состояния (ФУС) вириального вида, уравнения состояния, которые относятся к классу ЕФУС, должны, помимо требований, которые предъявляются к ФУС вириального вида, удовлетворять, по крайней мере, еще следующим требованиям:

$$\left(\partial^n p / \partial \rho^n\right)_T = 0, \quad \left(\partial p / \partial \rho\right)_T \Big|_{T \rightarrow T_c, \rho = \rho_c} = o(\tau), \quad (2)$$

где $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $N \geq 4$; o – символ Ландау.

Кроме того, функция $\phi_0(\omega)$ должна удовлетворять условиям:

$$\phi_0(\omega \rightarrow 0) \sim o(\omega^2), \quad (3)$$

$$\phi_0(\omega \rightarrow 1) \rightarrow const + o(\chi^M), \quad (4)$$

где $\chi = (\omega - 1)$, $M \geq 1$.

Выполнение требования (3) обеспечивает качественно верное описание области малых плотностей и давлений на основе $F^{(reg)}(\rho, T)$, а выполнение требований (2) и (4) позволяет воспроизвести степенные законы МТ на основе $F^{(nreg)}(\rho, T)$, так как в этом случае ЕФУС в асимптотической окрестности критической точки сводится к масштабному уравнению Вайдома.

Мы показали на примере анализа уравнений [2–6], которые содержат в своей структуре масштабные функции различного вида, как невыполнение одного или нескольких требований (2)–(4) влияет на величину неопределенности термических и калорических свойств чистых веществ, рассчитанных на основе

^(*) С.В. Рыков, toggl@yandex.ru

ЕФУС вида (1). Мы также рассмотрели влияние масштабных функций различного вида на возможность численного расчета равновесных свойств непосредственно на основе выражения для $F(\rho, T)$ (1) по известным формулам, например, $p = \rho^2 (\partial F / \partial \rho)_T$ и $C_V = T^2 (\partial^2 F / \partial T^2)_\rho$. Мы рассмотрели масштабные функции $a(x)$ и $h(x)$, соответственно, свободной энергии Гельмгольца [2, 4–6]:

$$a(x) = \sum_n A_n (x + x_n)^{2-\alpha} + \sum_n B_n (x + x_n)^\gamma + C, \quad (5)$$

и химического потенциала:

$$h(x) = A(x + x_1)^\gamma + B(x + x_1)^{\gamma-2k\beta}, \quad (6)$$

где $k \in N$.

На примере расчета равновесных свойств аммиака, R1234yf, SF₆ и ряда других рабочих веществ, используемых в энергетике, мы показали, что численное интегрирование (1) следует использовать в случае масштабных функций типа (5), тогда как при использовании масштабных функций вида (6) рекомендуется иметь формулы, выведенные на основе (1) и известных термодинамических выражений для p , C_V и других равновесных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kiselev S.B., Ely J.F. Generalized crossover description of the thermodynamic and transport properties in pure fluids II. Revision and modifications // *Fluid Phase Equilib.* 2007. V. 252. P. 57–65.
2. Kozlov A.D., Lysenkov V.F., Popov P.V., Rykov V.A. Unique nonanalytic equation of state of the refrigerant R218 // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 1992. V. 62. P 611–617.
3. Bezverkhii P.P., Martynets V.G., Kaplun A.B. Meshalkin A.B. Thermodynamic properties of CO₂ at up to 200 MPa, including the critical region, calculated by the equation of state with small number of constants // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V.1105. P. 012156.
4. Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Rykov S.V., Ustyuzhanin E.E. A new variant of a scaling hypothesis and a fundamental equation of state based on it // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 946. P. 012118.
5. Рыков С.В. Фундаментальное уравнение состояния, учитывающее асимметрию жидкости // *Научно-технический вестник Поволжья.* 2014. № 1. С. 33–36.
6. Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Zaitsev A.V. Methods for calculating equilibrium properties of pure substances, considering the critical point features // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018 V.1128 012106.

S.V. Rykov, I.V. Kudryavtseva, V.A. Rykov
ITMO University, Saint-Petersburg

FEATURES OF CONSTRUCTION OF THE FUNDAMENTAL EQUATIONS OF STATE SATISFY THE REQUIREMENTS OF A SCALE HYPOTHESIS

Г.А. Рябов^(*), О.М. Фоломеев
ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский институт
(ОАО «ВТИ»), г. Москва

СЕПАРАЦИЯ И ВОЗВРАТ УЛОВЛЕННЫХ ЧАСТИЦ В АППАРАТАХ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

При сжигании твердых топлив в котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) важным является обеспечение большой кратности циркуляции частиц по контуру топка – циклон – система возврата. Высокий расход циркулирующих частиц определяет равномерность поля температур по высоте топки, обеспечивает выравнивание температур по сечению слоя, что особенно важно для крупных котлов с ЦКС с сечением топки 200 и более м². Расход частиц определяется прежде всего размерами частиц и скоростью газа. Частицы, участвующие в циркуляции, должны иметь скорость витания ниже скорости газа. Скорость витания определяется размерами частиц (средним диаметром по поверхности) плотностью частиц и физическими свойствами газа. Расход частиц, уносимых из слоя, зависит от массы слоя. Таким образом, для увеличения циркуляции необходимо иметь в слое максимально возможное количество частиц, способных циркулировать. Для котлов с ЦКС такие частицы находятся в диапазоне размеров 0,1 – 0,3 мм.

В [1] выдвигается положение об эффективном составе материала слоя с максимальным количеством частиц 0,1 – 0,4 мм, который позволяет перейти полностью в режим быстрого слоя от турбулентного слоя. Это достигается соответствующим составом подаваемого материала, повышением эффективности улавливания мелких частиц.

Новым направлением применения технологии кипящего слоя является использование связанных между собой реакторов с кипящим (КС) и циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Эти технические решения направлены на улавливание СО₂ и пиролиз и газификацию топлив с твердым теплоносителем [2]. Очень важным для систем связанных реакторов является поддержание большой кратности циркуляции материала и обеспечение надежной работы затворов и всех систем перетока частиц между реакторами.

В настоящей работе приведены результаты исследований сепарации частиц в циклоне и гидродинамики опускного движения уловленных частиц в опускных стояках и затворах. Эти исследования проведены на аэродинамической установке, описание которой приведено в [3], где также даны основные положения методики измерений и обработки результатов.

^(*) Г.А. Рябов, georgy.ryabov@gmail.com, GARyabov@vti.ru

По результатам работы установлено влияние запыленности потока на входе в циклон на сопротивление циклона и эффективность улавливания частиц. Показано, что с ростом запыленности сопротивление циклона снижается, а эффективность улавливания – увеличивается. Выполнен анализ гидродинамики опускного движения в стояках и затворах. Важным является установление границ опускного движения в плотном слое, переходной области и в оживленном виде. Отмечена возможность появления поршневых режимов, которые могут приводить к выносу частиц из стояка в циклон и ухудшению эффективности улавливания.

Приведены результаты исследования движения в пневматических затворах (петлевой затвор и L-клапан). Исследования проводились с помощью определения перепадов давлений на различных участках и методом газовых меток (подачи CO₂ вместе с оживающим воздухом).

По результатам исследований даны соответствующие расчетные зависимости и практические рекомендации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yue, Guangxi. The Update and the Future of CFB Combustion in China// Proc. of 23th Int. Con on FBC, May 13-17, 2018, Seoul, Korea.
2. Bo Leckner, Development of Fluidized Bed Conversion of Solid Fuels—History and Future , Proc. of the 22nd Int. Conf. on FBC, June 14-17, 2015, Turku, Finland, pp 2-11.
3. Рябов Г.А. Результаты расчетных и экспериментальных исследований гидродинамики циркуляционных контуров в аппаратах с циркулирующим кипящим слоем и системах со связанными реакторами /Рябов Г. А., Фоломеев О. М., Санкин Д. А., Мельников Д. А. // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 33 – 40.

G.A. Ryabov, O.M. Folomeev
JSC “All-Russian Thermal Engineering Institute”
(JSC VTI), Moscow

SEPARATION AND PARTICLES REMOVAL IN CIRCILATING FLUIDIZED BED APPARATUS

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЭС НА ПРИНЦИПЕ МНОГОПРОДУКТОВОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ВИХРЕВОМ СЖИГАНИИ БЕРЕЗОВСКОГО УГЛЯ КАНСКО-АЧИНСКОГО БАССЕЙНА

Учитывая относительно быстрое истощение нефти и газа, заменяющим топливом выступает уголь, не только в силу его значительных запасов, но и более равномерной распространенностью по регионам мира. Низкосортная часть идет на нужды электротеплоэнергетики, а из другой части можно производить примерно 130 видов полупродуктов, которые могут быть конвертированы в более чем 5000 полезных продуктов, начиная от космического топлива и кончая наноматериалами.

Магистральным направлением развития современной энергетики является использование перспективных угольных технологий на базе экологически чистых энергоблоков. Согласно Энергетической программе России до 2030 г. становление энергетики связано с крупными ТЭС на низкосортных углях и закритическими параметрами пара. Низкосортное топливо приводит к резкому возрастанию токсичных выбросов с дымовых газов, жидких стоков и золошлакоотходов.

Рассмотрены научно-технические основы экологически перспективных ТЭС (ЭПТЭС) на березовском угле КАБ с вихревой технологией сжигания на принципе мультикомплекса с производством не только основной продукции (электрической и тепловой энергии), но и дополнительной из отходов с потребительскими свойствами. Мультипродуктовый комплекс – это серия сопряженных с ТЭС, дорстройкомбинатов и агропредприятий, эффективно использующих отходы для производства сырья для стройиндустрии, металлургию и разнообразную сельхозпродукцию. Реализация таких мультипродуктовых кластеров (МПК) является, по нашему мнению, стратегическим направлением развития российской и мировой угольной энергетики.

Технико-экономическая эффективность ЭПТЭС мощностью в 6400 МВт с энергоблоком 800 МВт в концепции МПК с вихревой технологией сжигания БУ КАБ превосходит существующий аналог Березовской ГРЭС с блоком П-67. При этом удельный расход условного топлива – 327 г/кВт·ч (на 0.6% ниже), удельные капвложения – 1550 дол США (на 13% меньше) и себестоимость отпущенной

(*) В.В. Саломатов, vladsalomatov@yandex.ru

электроэнергии – 1.37 ц/кВт·ч (на 7.4% ниже). Расход угля на ЭПТЭС снижается на 13.7 млн дол США.

Обезвреживание газовых токсичных выбросов от NO_x и SO_x обеспечивается с помощью электронно-лучевой технологии. При использовании аммиака вырабатываются дефицитные минеральные удобрения (смесь нитрата и сульфата аммония в виде порошка). При этом капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности увеличиваются примерно на 430 дол США (не более 20% суммарных затрат на ЭПТЭС). Чистый доход от продажи только минеральных удобрений по мировым ценам составляет 164.8 млн дол США.

Продемонстрированы технические решения и разработаны технологические схемы по утилизации золошлаковых отходов при сжигании БУ КАБ. Выход золы и шлака от ЭПТЭС мощностью 6400 МВт на принципе МПК составляет 1230 тыс. т/год (золы – 600, шлака – 630 тыс. т/год). Количество этой золы хватит для производства в год 17 млрд шт. силикатного кирпича, 0.43 тыс. т ферросилиция, 1.2 тыс. т карбида кальция, 4.2 тыс. т цианамиды кальция. Уделено внимание вопросам утилизации тепловых выбросов с ЭПТЭС с получением на базе аппаратов мгновенного вскипания подпиточной воды для парогенераторов без применения спецхимводоочистки. Себестоимость полученной химобессоленной подпиточной воды примерно в 5 раз ниже, чем в установке ХВО.

Сформулированные научно-технические и технологические основы создания ЭПТЭС на принципе МПК, выполненные расчеты и анализ технико-экономических показателей для производства различных видов продукции с потребительскими свойствами, в том числе из отходов, показывают его техническую эффективность и финансовую состоятельность. При существующем оборудовании, ценах и тарифах на производимую продукцию, ЭПТЭС за период жизненного цикла окупится более чем в два раза. Уже после 8 лет с начала сооружения ЭПТЭС с МПК начинает приносить прибыль.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-58-44020 Монг-а).

V.V. Salomatov^{1,2}

¹Institute of Thermophysics SB RAS,

²Novosibirsk state university

**ENVIRONMENTALLY PERSPECTIVE TPP ON THE PRINCIPLE
OF A MULTI-PRODUCT COMPLEX AT VORTEX BURNING
OF BEREZOVSKY COAL KANSKO-ACHINSKY BASIN**

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕШЁТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МИНИСТРУЙ

Параллельные министруи имеют широкое применение в промышленности – они используются в системах охлаждения микросхем, вентиляции, удаления отходов и впрыска топлива. Взаимодействие подобных струй изучается достаточно давно [1-2], существуют успешные примеры численного моделирования с помощью уравнений Навье-Стокса для случая двух турбулентных струй [3]. В данной работе предлагается использовать метод решёточных уравнений Больцмана для моделирования систем параллельных плоских министруй для исследования динамики их взаимодействия.

Методы решёточных уравнений Больцмана (LBM) – класс методов вычислительной физики, который основывается на решении кинетических уравнений Больцмана. Основная их особенность состоит в том, что вместо решения уравнений сохранения для макроскопических величин, этот метод моделирует среду, состоящую из виртуальных частиц, которые участвуют в процессах движения и столкновения. Такой подход позволяет методу быть эффективным при решении задач со сложной геометрией, микроскопическими взаимодействиями и др., при этом процесс вычислений хорошо распараллеливается.

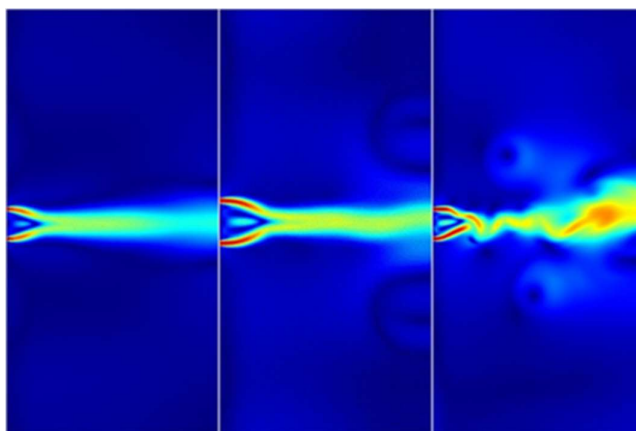


Рис. 1. Распределение скорости в системе двух струй при $Re = 40, 60$ и 80

(*) А.Л. Сангадиев, xallrbu@gmail.com

В настоящей работе представлены результаты моделирования с помощью LBM системы из двух (рис. 1) и трех (рис. 2) параллельных плоских мини-струй при числах Рейнольдса $Re=40\dots 80$ и расстояниях между осями струй $H/d=2..6$. Получена динамика объединения двух струй в одну, отмечен ее нестационарный характер при повышении числа Рейнольдса. При $Re = 40$ проведено сравнение с традиционным методом решения уравнений Навье-Стокса, отмечено удовлетворительное согласование.

Для системы из трех струй отмечен существенно иной характер смешения струй, чем для случая пары струй. Это, очевидно, обусловлено принципиально разным характером взаимодействия центральной и боковых струй. В данном случае процесс остается нестационарным при существенно меньших числах Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00986).

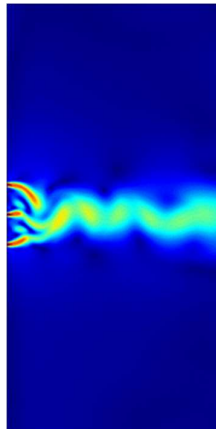


Рис. 2. Распределение скорости в системе трех струй при $Re = 40$

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanaka E., The interference of two dimensional parallel plane jets // Trans. Bull. JSME, vol. 13, pp. 272-280.
2. Elbanna H., Gahin S., Rashed M. I. I., Investigation of two-plane parallel jets // AIAA Journal, vol. 21, no.7, pp. 986–991.
3. Mondal T., Das M.K., Guha A., Periodic vortex shedding phenomenon for various separation distances between two plane turbulent parallel jets // Int. J. Heat Mass Trans., vol. 99, pp. 576-588.

A.L. Sangadiev¹, V.V. Terekhov²

¹Novosibirsk State University,

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR PLANE MINI-JETS INTERACTION DYNAMICS

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ШАРА

Нестационарное плёночное кипение недогретой жидкости не имеет полной экспериментальной базы и общепринятого теоретического описания. Термометрия не обеспечивает приемлемого метрологического уровня (неопределённость 15...20%), поскольку для нахождения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (КТО) требуется решать обратную задачу теплопроводности при искусственных допущениях.

Новые возможности даёт градиентная теплометрия, использующая гетерогенный градиентный датчик теплового потока (ГГДТП), генерирующий сигнал при прохождении через него теплового потока (поперечный эффект Зеебека) [1]. Уникально низкая постоянная времени ($10^{-8} \dots 10^{-9}$ с) позволяет считать ГГДТП практически безынерционным.

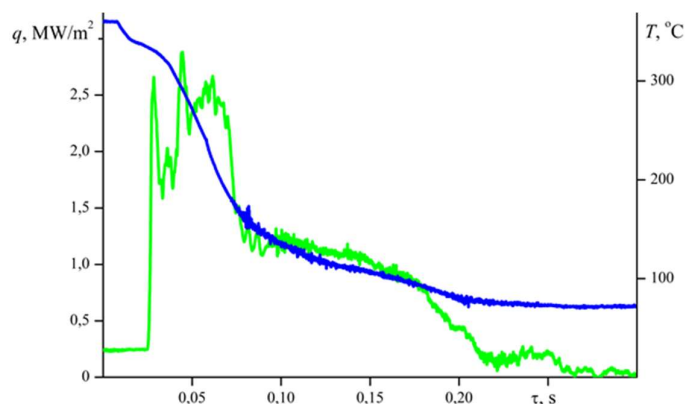


Рис.1. Временная зависимость плотности теплового потока (зелёная кривая) и температуры (синяя) на поверхности шара

Экспериментальный образец – шар диаметром 25 мм, изготовленный из латуни Л68, на «южном полюсе» которого вмонтирован заподлицо с поверхностью и закреплён термостойким компаундом ГГДТП площадью 20 мм².

Шар нагревался до температуры 673 К и опускался в воду с температурой 293 К. Полученные в опыте зависимости плотности теплового потока и температуры на поверхности шара от времени представлены на рис. 1. Все выбросы на кривой теплового потока коррелируют с данными видео-съёмки, проводившейся с частотой 1000 кадров в секунду (рис. 2).

^(*) В.В. Субботина, subbotina.vv@edu.spbstu.ru

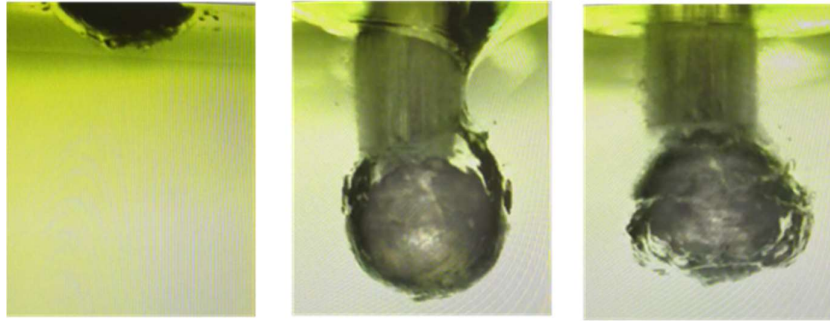


Рис.2. Развитие кипения. Кадры высокоскоростной съемки

Повторяемость результатов нельзя считать удовлетворительной, так как от опыта к опыту видоизменялась поверхность шара (рис.3). Поэтому для дальнейшего исследования будут использованы такие материалы, как сплавы титана и коррозионностойкие стали.



Рис.3. Поверхность шара до и после опытов

Пилотные опыты подтвердили работоспособность ГГДТП в условиях высоких температур. При кипении на поверхности шара, погруженного в недогретую воду, достигнута максимальная плотность теплового потока 3 МВт/м^2 , втрое большая первой критической плотности при кипении насыщенной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы градиентной теплотометрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 203 с.

S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, V.V. Subbotina
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT IN STUDY OF HEAT
TRANSFER DURING SUBCOOLED WATER BOILING AT SPHERE**

А.А. Сафронов, В.Е. Кузнецов, Ю.Д. Дудник^(*),
О.Б. Васильева, В.Н. Ширяев
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕЗ ГАЗА

Синтез газ является не только ценным химическим сырьем, он может быть использован в качестве альтернативного вида топлива. При этом, для его получения возможно использование органосодержащего сырья, в число которого входят уголь, дерево, а также бытовые отходы. В последние десятилетия в США разработан широкий спектр оборудования, в том числе турбины и построены две электростанции, работающие на синтез газе из угля по технологии Plasma Enhanced Melter (PEM) [1].

Использование плазменных систем для получения синтез газ позволяет значительно повысить эффективность и экономическую привлекательность этой технологии, так как отличительной особенностью плазменного пиролиза перед традиционным автотермическим является:

1. диапазон температуры в реакторе в интервале от 1000 до 10000 К;
2. глубокая деструкция сырья при одновременном уменьшении объема отходящих газов;
3. более высокая скорость химических процессов в реакторе за счет высокой термической и химической активности низкотемпературной плазмы.
4. высокая экологическая безопасность процесса, достигаемая за счет физических параметров проведения процесса и использования специальных технических мер, камер дожигания и закалки.

На протяжении нескольких десятилетий в ИЭЭ РАН ведутся работы по созданию плазмотронов переменного тока [2-3], которые могут быть использованы и для получения синтез газ. За это время были разработаны генераторы плазмы различного назначения, мощности, позволяющие использовать в качестве плазмообразующей среды широкий спектр газов (в том числе и окислительные) и их смесей. Основными генераторами плазмы, эксплуатируемыми в установках плазменного пиролиза, выступают два типа генераторов: трехфазные с рельсовыми электродами мощностью 100-500 кВт и однофазные с торцевыми электродами мощностью до 100 кВт.

На базе плазмотронов построен ряд установок в России [4] и за рубежом и показана возможность получения синтез газ из различного сырья, определены параметры процесса и уровень энергозатрат в зависимости от состава и калорийности сырья. Показано, что плазменные технологии получения синтез

^(*) Ю.Д. Дудник, julia_dudnik-s@mail.ru

газа являются перспективным направлением в области альтернативной возобновляемой энергетики [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ducharme C. Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes // Department of Earth and Environmental Engineering, Fu Foundation of Engineering and Applied Science, Columbia University, 2010. P. 79.
2. Dudnik Yu D., Borovskoy A.M., Shiryaev V.N., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Ivanov D.V. Plasma injector for a three-phase plasma torch with rail electrodes and some results of its investigation // J. of Phys. Conf. Ser., 2018. V. 946(1). P. 012167.
3. Сафронов А.А., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н. Исследование работы высоковольтных плазмотронов со стержневыми электродами // ТВТ, 2018. Т. 56. №6. С. 871-875.
4. Батенин В.М., Масленников В.М., Толчинский Л.С. Энерготехнологические комплексы – перспективный путь освоения топливных ресурсов // Новости теплоснабжения, 2014. №04. 164 с.
5. Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimtsev A.A., Shtengel S.V. On efficiency of plasma gasification of wood residues // Biomass and Bioenergy, 2011. V. 35(1). P. 495-504.

A.A. Safronov, V.E. Kuznetsov, Yu.D. Dudnik,
O.B. Vasilieva, V.N. Shiryaev
Institute for Electrophysics and Electric Power
Russian Academy of Sciences

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE POSSIBILITY FOR PLASMA INSTALLATION USAGE FOR SYNGAS OBTAINING

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОНОМИЯ РЕСУРСОВ ЗА СЧЕТ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУЙНОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ 4-Х ЭТАЖНОЙ ПОДЗЕМНОЙ АВТОСТОЯНКИ В НКЦ КАЗАНИ

Увеличение транспортных потоков вследствие ускоренной урбанизации потребовало создания большого количества новых парковочных мест. Отсутствие свободных площадей в жилых, торговых и деловых зонах современных мегаполисов привело к необходимости строительства многоярусных подземных автостоянок. Для таких сооружений характерно загрязнение воздуха выхлопными газами и высокий уровень пожарной опасности. Система вентиляции таких объектов должна обеспечить удаление вредных веществ в штатном режиме и эффективное дымоудаление при пожаре [1, 2].

Внедрение новой для России, но широко применяемой во всем мире реверсивной струйной системы вентиляции автостоянок, потребовало разработки новой нормативной базы [3, 4] на основе которой была спроектирована данная система вентиляции, представленная на рис. 1.

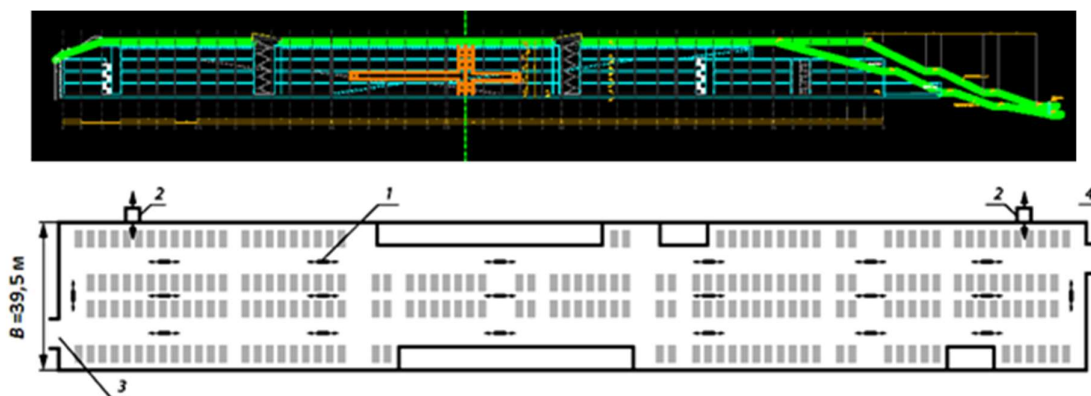


Рис. 1. Схема 4-х этажной подземной автостоянки в Казани, оснащенной системой струйной вентиляции: 1 – реверсивный струйный вентилятор; 2 – вентиляционные шахты притока-вытяжки; 3 – въезд; 4 – выезд

Система реверсивной струйной вентиляции двойного назначения обеспечивает штатный и аварийный (пожарный) режимы работы, имеет в своем составе вентиляционное оборудование производства компании FlaktGroup.

* А.П. Волков, alex78477@yandex.ru

Струйная вентиляция обеспечивает качественное проветривание автостоянки, без образования застойных (неприветриваемых) зон. Перемешивание загрязненного воздуха при помощи струйных вентиляторов позволяет отказаться от обязательного требования по организации вытяжки отдельно из верхней и нижней зоны помещения.

Показано, что применение реверсивной струйной вентиляции допускает увеличение площади пожарного отсека, оснащенного автономными системами противодымной и общеобменной вентиляции, с 3000 до 10000 м². Причем отказ от разветвленных канальных систем воздухопроводов в пользу струйных вентиляторов позволил уменьшить высоту потолочных перекрытий, что позволяет повысить эффективность освоения подземного пространства. И уменьшить удельные энергозатраты на систему вентиляции примерно на 10%. При проектировании системы вентиляции автостоянки было выполнено CFD моделирование полей скоростей, температур и концентраций вредных веществ при пожаре и в штатном режиме работы. Выполнено моделирование эвакуации людей из помещения автостоянки при возникновении пожара. В процессе пусконаладочных работ осуществлена экспериментальная проверка работы системы вентиляции с использованием имитационного очага горения и горячего дыма. Показано, что численное CFD моделирование и экспериментальная проверка подтвердили правильность принятых проектных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А.П., Свердлов А.В. Реверс воздушного потока при продольной вентиляции и дымоудалении подземных и крытых автостоянках // АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. 2015. №1. С. 34–38.
2. Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Волков М.А. Барафанова Е.Ю. Моделирование процессов дымоудаления в подземных сооружениях транспортного назначения// Вестник Международной академии холода. 2019. №1. С.3–10.
3. СП 300.1325800.2017 Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования.
4. СТО НОСТРОЙ/НОП 2.15.194-2016. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. «Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования и монтажа, контроль выполнения, требования к результатам работ».

A.V. Sverdlov^{1,2}, A.P. Volkov², M.A. Volkov¹, S.V. Rykov¹, M.M. Guliyanc¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg,

²FlaktGroup Russia, Moscow

NEW TECHNICAL SOLUTIONS FOR DESIGN AND START UP OF REVERSIBLE VENTILATION SYSTEM FOR 4-LEVELS UNDEGROUND CARPARK IN KAZAN CITY

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ КОНФУЗОРНОЙ ЩЕЛИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВЫСТУПЕ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Проблема интенсификации теплообменных процессов приобрела особую важность при решении задач энергосбережения в различных направлениях теплоэнергетики. Как правило, эта проблема часто и успешно решается путем использования наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена. Одними из наиболее широко используемых методов интенсификации теплообмена в энергетическом оборудовании является использование на поверхности теплообмена периодических поперечных уступов, выступов, ребер и т.п. [1-6]. В основе механизма интенсификации теплоотдачи в таком случае лежит отрыв и повторное присоединение потока.

В работах [1-4] по интенсификации теплообмена в каналах со сплошными выступами в качестве дискретных элементов использовались препятствия прямоугольной формы. Исследовано влияние на теплогидравлические характеристики потока размеров, формы выступов и их расположения. Отрывное течение за плоским отсоединенным и щелевым выступом отличается рядом особенностей по сравнению со сплошным выступом, в том числе и по интенсификации теплообмена [3-7]. В работах [6, 7] исследовалось влияние расстояния между стенкой трубы и преградой, а также угла ее установки на структуру отрывного течения и теплообмен. В работе [3] проведен экспериментальный анализ турбулентного обтекания поперечных щелевых выступов, расположенных на плоской пластине. Рассмотрены выступы с конфузорной, диффузорной и постоянного сечения, но конечной длины щелью между пластиной и нижней стенкой выступа. Показано, что формирующаяся в щели пристеночная струя приводит к сильной деформации отрывного течения за выступом. В случае выступа с конфузорной щелью ускоренный пристеночный струйный поток увлекает оторвавшийся сверху выступа поток и приводит к более эффективному подавлению рециркуляционной зоны по сравнению с выступом с диффузорной щелью и со щелью постоянного сечения.

В работе [3] проведено численное и экспериментальное исследования гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании одиночного прямоугольного присоединенного с разными формами щели выступа. Автором отмечено, что на боковых границах щели в поперечном направлении

* П.А. Семенёв, semenyov@gmail.com

наблюдается пара симметричных протяженных пятен с повышенными значениями коэффициента теплоотдачи, особенно в случае выступов с конфузорной щелью. Это указывает на более интенсивное взаимодействие поперечных вихрей и продольной рециркуляции на боковых границах щели, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи.

В данной работе проведено численное исследование влияния размеров щели на теплоотдачу и гидродинамику на плоской пластине при установке одиночного прямоугольного выступа с конфузорной щелью с разной длиной щели (50, 40, 30, 20 и 10 мм). Щелевой канал конечной длины располагается между пластиной и нижней стенкой выступа квадратного сечения высотой $h = 3,2$ мм с поперечным размером 300 мм. Численное моделирование выполнено для несжимаемой жидкости в рамках трехмерных уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу, замкнутых с помощью стандартной k - ϵ модели с модификацией Като-Лаундера. Проведено численное исследование и анализ влияния размеров щели на структуру турбулентного течения, поле турбулентной кинетической энергии, поле температуры и поле коэффициента теплоотдачи на поверхности теплообмена. Интегральные характеристики, которые включаются в средний коэффициент теплоотдачи, сопротивления и теплогидравлической эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Han J.C. Heat transfer and friction in channels with two-opposite rib-roughened walls // J. of Heat Transfer. 1984. Vol. 106. P. 774-781.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 206 с.
3. Кон Дехай. Влияние геометрии турбулизирующих пористых вставок на фактор аналогии Рейнольдса. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автореферат. к.т.н. 2019, 16 с.
4. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках / В.И. Терехов, Т.В. Богатко, А.Ю. Дьяченко и др.; Под ред. В.И. Терехова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 247 с.
5. Молочников, В.М., Михеев, Н.И., Давлетшин И.А., Паерелий А.А. Гидродинамические и тепловые процессы в отрывных течениях за препятствиями при организации пристенных струй // Известия РАН. Энергетика. 2008. № 1. С. 137–144.
6. Терехов В.И., Богатко Т.В. Структура отрывного течения и теплообмен при турбулентном обтекании отсоединенной диафрагмы в круглой трубе // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 2. С. 57-66.
7. Yongsiri K., Eiamsa-ard P., Wongcharee K., Eiamsa-ard S. Augmented heat transfer in a turbulent channel flow with inclined detached-ribs / Case Stud Therm Eng. 2014. V.3. P.1-10

P.A. Semenev^{1,2}, V.N. Afanasiev¹, Dehai Cong¹

¹Bauman Moscow State Technical University,

²P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors

NUMERICAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF RIB CONFUSER SLIT SIZE ON HEAT TRANSFER AUGMENTATION ON THE FLAT PLATE

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ РЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПЛАВЛЕНИЯ**

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию температурных зависимостей теплофизических свойств рения в области плавления. В число исследуемых свойств входят: удельные энтальпия, теплоемкость, электросопротивление, теплота плавления, термическое расширение и спектральная излучательная способность материала.

Суть реализованного метода заключается в быстром нагреве образца до $T_{пл}$ и выше за время от 100 мкс до 2000 мкс за счет объемного выделения тепла при прохождении по образцу электрического тока большой плотности. Нагрев осуществляется в изобарических условиях в камере высокого давления при статическом давлении буферного (инертного) газа аргона. Введенная энергия или изменение энтальпии $\Delta H(t)$ может быть определена путем измерения тока $I(t)$ и падения напряжения $e(t)$ между потенциальными зондами в средней части образца.

Температурные измерения выполняются двухканальным оптическим пирометром, реализующим метод спектральных отношений. Таким образом, измеряя температуру поверхности образца во время эксперимента $T(t)$, ток $I(t)$ и напряжение $e(t)$, можно определить зависимость изменения энтальпии $\Delta H(T)$, а также теплоемкости $C_p(T)$.

Кроме того, настоящая установка оснащена спектрометром со спектральным диапазоном измерения 240–795 нм и минимальным временем экспозиции около 1 мс, позволяющим проводить измерение истинной температуры образца после остановки нагрева при заданной температуре. Одновременное измерение истинной температуры с помощью спектрометра и яркостных температур на длинах волн 650 нм и 862 нм с помощью пирометра позволяет определять излучательную способность исследуемого материала на указанных длинах волн.

Для измерения термического расширения материала образца используется высокоскоростная видеокамера с разрешением 1280 x 1024 пикселя и характерным временем между кадрами около 200 мкс. При этом используется собственное свечение нагретого образца, что позволяет также контролировать однородность нагрева и отсутствие шунтирующего пробоя вдоль его поверхности.

^(*) В.Н. Сенченко, pyrolab@ihed.ras.ru

Упрощенная схема используемой экспериментальной установки изображена на рисунке 1. Подробное описание установки представлено, например, в работах [1-2].

Полученные температурные зависимости теплофизических свойств рения представляют интерес, в частности, для построения широкодиапазонных уравнений состояния, а также для использования в высокотемпературной технике.

Данная работа была выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».

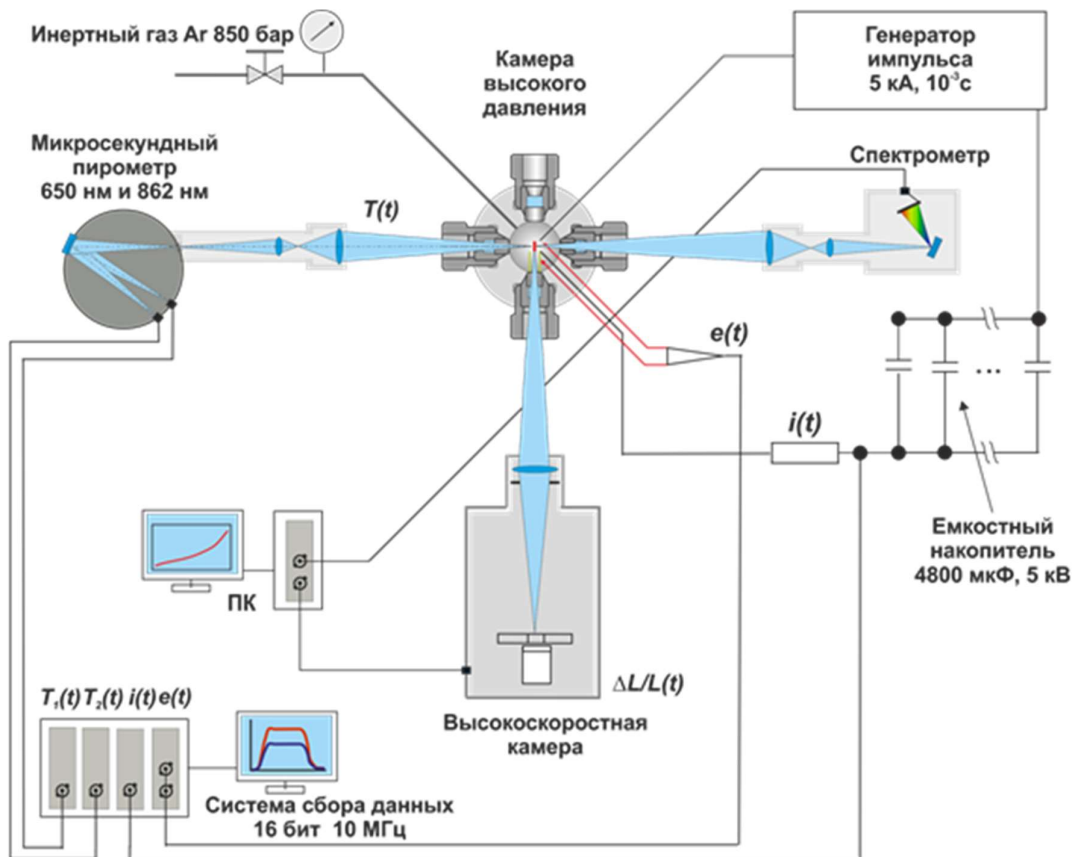


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной установки

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенченко В.Н., Беликов Р.С. // Известия вузов. Физика, 2018. Т. 61. 9/2. С. 157–60.
2. Senchenko V.N., Belikov R.S. and Popov V.S. // J. Phys.:Conf. Ser., 2015. V. 653. 012100.

V.N. Senchenko, R.S. Belikov
 Joint institute for high temperatures Russian academy of Sciences

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF RHENIUM NEAR ITS MELTING POINT

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА И ДИНАМИКИ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ В ОБЛАСТИ СУБАТМОСФЕРНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Давление является одним из наиболее важных параметров, оказывающих комплексное влияние на процесс парообразования, интенсивность теплоотдачи и развитие кризисных явлений при пузырьковом кипении. Режимы теплообмена при парообразовании в условиях субатмосферных давлений реализуются на практике, в частности в абсорбционных холодильных машинах. Таким образом, исследование особенностей кипения жидкости при пониженных давлениях является не только актуальной фундаментальной, но и важной прикладной задачей.

На сегодняшний день в литературе представлен обширный массив экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи и особенностям динамики парообразования при кипении в области субатмосферных давлений [2, 3]. Однако в то же время в литературе отсутствуют опытные данные по влиянию давления на важнейшие характеристики кипения такие, как эволюцию тройной контактной линии, динамику сухих пятен и испарение микрослоя в основании пузырей. В настоящей работе с использованием высокоскоростных методик и специальной конструкции прозрачного нагревателя были получены новые опытные данные по интегральным и локальным характеристикам теплообмена при кипении жидкости в области субатмосферных давлений.

Эксперименты были проведены при кипении воды в условиях насыщения при варьировании давления от 8.8 до 103 кПа. Прозрачная сапфировая подложка толщиной 3 мм с напыленным прозрачным тонкопленочным нагревателем была использована в качестве нагревателя. Визуализация процесса кипения жидкости с нижней и боковой сторон нагревательной поверхности была проведена с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры с частотой съемки до 20 кГц и пространственным разрешением 35 мкм/пикс. Для исследования нестационарного поля температур нагревательной поверхности и построения соответствующих кривых кипения для различных давлений в работе была использована высокоскоростная термографическая камера Titanium HD 570M с частотой съемки 1 кГц.

На рис. 1 представлены кадры высокоскоростной визуализации эволюции парового пузыря при кипении воды при давлении $p_s = 8.8$ кПа. Как видно из рисунка, такой формат съемки позволил в настоящей работе проанализировать

(*) В.С. Сердюков, vsserd@gmail.com

как зависимость размера паровых пузырей от времени, так и эволюцию сухих пятен в основании пузырей. Кроме того, с использованием данных видеосъёмки с нижней стороны нагревателя была также проанализирована плотность центров парообразования при кипении и показано, что данная величина существенно уменьшается при понижении давления.

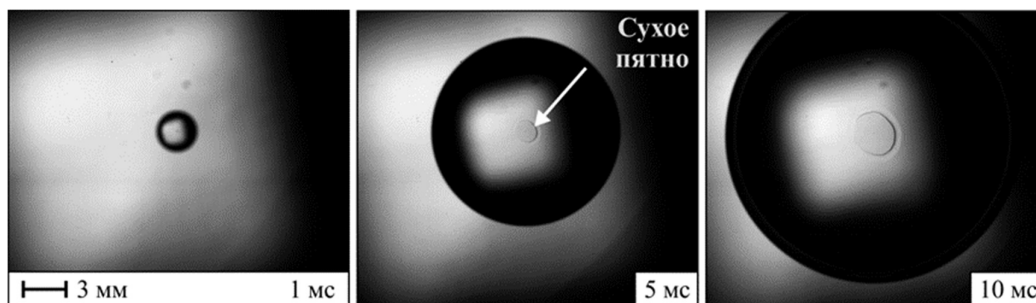


Рис. 1. Кадры высокоскоростной визуализации динамики одиночного парового пузыря при кипении воды при $p_s = 8.8$ кПа, $q = 40$ кВт/м².

В работе впервые были получены опытные данные по влиянию понижения давления на динамику сухих пятен под паровыми пузырями при кипении воды. В частности, показано, что радиус контактной линии для всех измеренных давлений линейно растёт со временем, что говорит о том, что скорость роста сухих пятен постоянна. При этом скорость роста сухих пятен имеет не монотонную зависимость от давления с явно выраженным минимумом в области 40 кПа.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 18-79-00078).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва: Атомиздат, 1979. 415 с.
2. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М: Издательский дом МЭИ, 2000. 386 с.
3. Gao W. et al. Experimental investigation on bubble departure diameter in pool boiling under sub-atmospheric pressure // Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2019. V. 134. P. 933.

V.S. Serdyukov^{1,2}, A.S. Surtaev^{1,2}, I.P. Malahov^{1,2}
¹Novosibirsk State University,
²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

FEATURES OF BOILING HEAT TRANSFER AND BUBBLE DYNAMICS AT SUB-ATMOSPHERIC PRESSURE

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ ОБТЕКАНИИ ТРУБЫ С КОЛЬЦЕВЫМИ РЕБРАМИ**

При создании новых и модернизации существующих рекуперативных теплообменников важно изучить и выявить связи между течением, полем температуры и распределением теплового потока на теплообменных поверхностях. При этом важны как осредненные, так и мгновенные параметры теплообмена. Для комплексного исследования течения и теплообмена на неизотермических поверхностях в режиме реального времени совмещены PIV диагностика, градиентная теплометрия [1] и термометрия. Градиентные датчики теплового потока (ГДТП) с постоянной времени $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с фиксируют плотность теплового потока практически безынерционно. Дополнив результаты градиентной теплометрии данными термометрии и полями скорости, мы смогли выявить влияние на теплообмен режимных и геометрических параметров.

Экспериментальный стенд разработан на базе дозвуковой аэродинамической трубы, оснащенной системой PIV «ПОЛИС» [2]. В качестве модели использован полый круглый цилиндр, обогреваемый насыщенным водяным паром при давлении, близком к атмосферному. Опыт был разделен на два этапа: сначала на цилиндре монтировались 5 кольцевых ребер с относительной высотой 0,303. Среднее ребро выполнено полым (изотермическим, «идеальным»), остальные – из органического стекла (прозрачный материал позволил визуализировать течение в межреберном зазоре). 3 ГДТП размерами $2 \times 2 \times 0,2$ на основе монокристаллического висмута с вольт-ваттной чувствительностью около 10 мВ/Вт устанавливались на среднем ребре на различном удалении от его корня. Цилиндр с ребрами проворачивался вокруг оси на угол $\phi = 0 \dots 180^\circ$. Затем на место полого монтировалось сплошное ребро из титанового сплава ВТ22. Режимы и методика эксперимента в обоих случаях совпадали. Отличия опытов заключались в том, что температура на поверхности сплошного ребра не была постоянной, и ее местные значения требовалось измерять. Для измерения разности температур между свободным потоком и поверхностью ребра в местах установки ГДТП использовалась полупроводниковая термопара медь – сплав ВТ22 [3].

Опыты охватывали диапазон чисел Рейнольдса $Re = 0,4 \dots 50 \cdot 10^4$. Шаг измерений плотности теплового потока и температуры поверхности ребра по углу ϕ составил 20° . Расстояние между ребрами варьировалось в пределах $\delta = 5 \dots 20$ мм. По результатам тепло- и термометрии был рассчитан местный, а затем

^(*) В.В. Сероштанов, vladvik1992@gmail.com

и средний по поверхности коэффициент теплоотдачи при различных режимах течения. Зависимость среднего числа Нуссельта Nu от числа Рейнольдса Re представлена на рис. 1. Использование модели с полым и сплошным ребром позволило также экспериментально оценить эффективность кольцевого ребра.

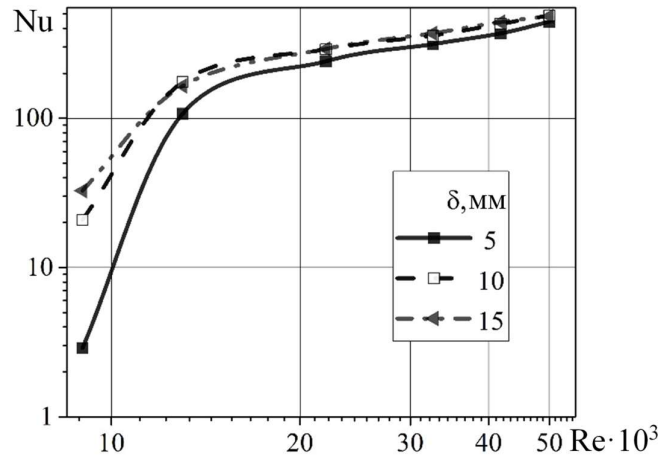


Рис. 1. Зависимость среднего числа Нуссельта от режима течения при различном межрёберном расстоянии

Сочетание методик позволило получить местные и осредненные (по времени и поверхности) параметры теплообмена при обтекании цилиндра с кольцевыми рёбрами, дополнив их картиной течения. Предлагаемый подход может существенно расширить возможности эксперимента при изучении конвективного теплообмена на неизотермических поверхностях различной формы. Полученные результаты могут также послужить основой для верификации численных моделей и привнести новую информацию, необходимую для расчета оребренных поверхностей теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы градиентной теплометрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2012. – 203 с
2. «ПОЛИС» измеритель полей скорости [Электронный ресурс]/Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск. - Режим доступа: <http://www/itp.nsc.ru/piv/piv.htm>.
3. Я.Г. Усачев. Явления, происходящие при резании металлов. ПГ, тип. Р. Г. Шредера, 1915, 245с.

V.V. Seroshtanov, A.A. Gusakov, M.A. Grekov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

MULTI-METHOD RESEARCH OF FLOW AND HEAT TRANSFER FOR THE TUBE WITH CIRCULAR FINS

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ПРИ БОЛЬШИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

Представлены результаты компьютерных исследований (CFD design 10.0) вихреобразования и изменения направления вращения вихрей внутри коротких тепловых труб (ТТ) с паровым каналом, выполненным в форме сопла Лавалья. Установлено, что паровой вихрь, возникающий в результате взаимодействия потока влажного сжимаемого пара с нормально расположенной плоской поверхностью верхней крышки может изменять направление своего вращения в зависимости от величины температурного напора на испаритель ТТ.

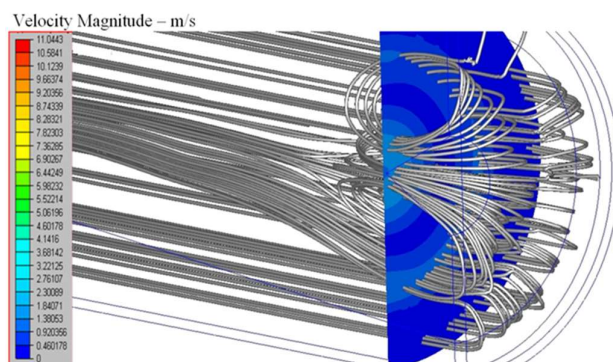


Рис. 1.

На рис. 1 показано возникновение парового тороидального вихревого кольца вблизи поверхности конденсации в выполненном в виде сопла Лавалья паровом канале ТТ при низком температурном напоре на испаритель относительно температуры кипения рабочей жидкости при атмосферном давлении, $\delta T = T_{ev} - T_B = 10$ К. Движущиеся струи пара из-за эффекта Коанда прилипают к стенкам ТТ и вследствие этого направление вращения вихревого кольца формируется от периферии к центру парового канала. При этом толщина пленки конденсата под вихревым кольцом увеличивается и ее течение затормаживается из-за поверхностного трения $c_f = 10^{-2} \div 10^{-3}$.

При увеличении температурного напора направление вращения парового вихря меняется на противоположное, от продольной оси к периферии парового канала, и направление вращения прилегающих слоев пара и течения пленки жидкого конденсата становится одинаковыми, что приводит к уменьшению эффективной толщины пленки.

^(*) А.В. Серяков, seryakovav@yandex.ru

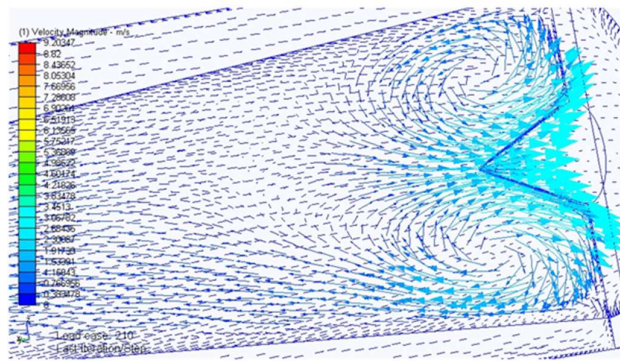


Рис. 2.

На рис. 2 показано возникновение тороидального вихревого кольца вблизи поверхности конденсации внутри выполненного в виде сопла Лаваля паровом канале ТТ при увеличенном температурном напоре в испаритель, $\delta T = T_{ev} - T_B = 20$ К. При этом направление закрутки вихревого кольца становится от центра к периферии канала.

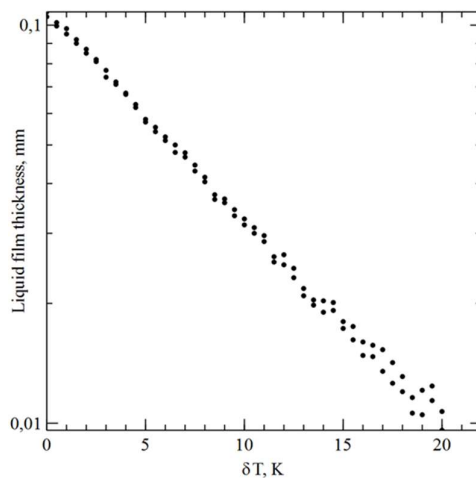


Рис. 3.

На рис. 3 показаны экспериментальные значения толщины пленки жидкого конденсата под поверхностью вихря, в полулогарифмической шкале, полученные с помощью емкостных датчиков, показывают резкое уменьшение толщины при увеличении температурного напора, что может быть косвенным подтверждением изменения направления вращения парового вихря в паровом канале коротких ТТ.

A.V. Seryakov
 LLC «RUDETRANSSERVICE», Veliky Novgorod

THE STUDY OF VORTEX FORMATION IN THE VAPOUR CHANNEL OF SHORT LOW TEMPERATURE HEAT PIPES AT HIGH HEAT LOADS

РЕЗОНАНСНОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ПРИ БОЛЬШИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

Представлены результаты исследований коэффициента теплопередачи коротких линейных тепловых труб (ТТ) с паровым каналом, сформированным капиллярно-пористой вставкой в виде внутреннего сопла, близкого к соплу Лаваля, при больших тепловых нагрузках и воздействии внешних вибраций.

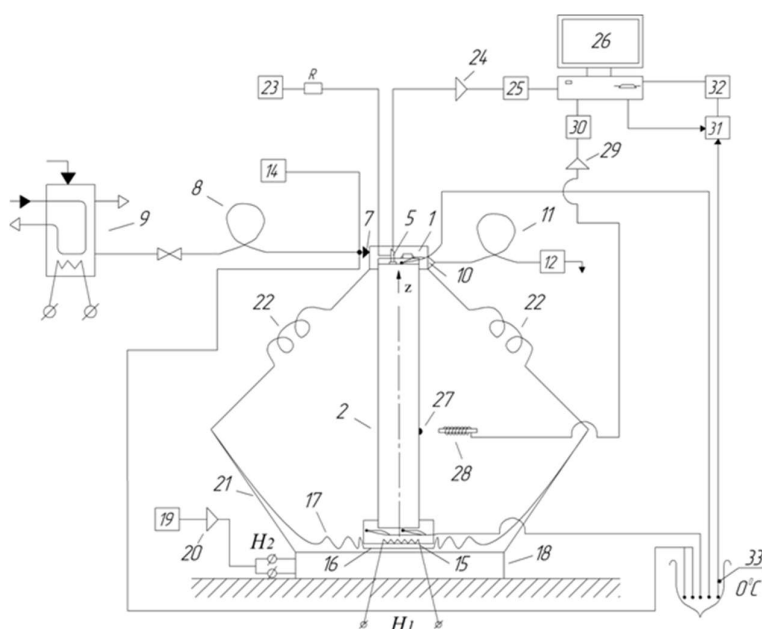


Рис.1. Схема вибрационных измерений коэффициента теплопередачи коротких ТТ. 1 - микрокалориметр; 2-ТТ; 3-фланец; 4- генератор; 5 – емкостный датчик; 6-каналы для проводов; 7-входной штуцер; 8- напорный шланг; 9-сосуд постоянного напора; 10-выходной штуцер; 11- сливной шланг; 12-расходомер; 13 - крышка; 14 - генератор пузырьков; 15 - нагреватель; 16 - опорный диск; 17 -диффузор; 18 - звуковой динамик; 19 - генератор; 20 - усилитель; 21 - диффузородержатель; 22 - пружины; 23 - генератор; 24 - усилитель; 25 - осциллограф; 26 – компьютер; 27 - постоянный магнит; 28 - измерительная катушка; 29 - устройство контроля вибраций; 30 – частотомер; 31 – коммутатор; 32 – вольтметр; 33 – сосуд Дьюара.

При больших тепловых нагрузках парообразование в капиллярно-пористом испарителе и распространение пара в паровом канале приобретает пульсационный характер с частотой 400-500 Гц и амплитудой пульсаций до

^(*) А.В. Серяков, seryakovav@yandex.ru

103Па [1]. Показано, что при внешнем продольном вибрационном воздействии с частотой, равной частоте возникших внутренних паровых пульсаций коэффициент теплопередачи ТТ достигает максимума и увеличивается на величину до 20%. На рисунке 1 представлена схема измерений коэффициента теплопередачи ТТ, на рисунке 2 приведены результаты этих измерений.

Повышение коэффициента теплопередачи обусловлено интенсификацией процесса кипения в сеточном капиллярно-пористом испарителе ТТ.

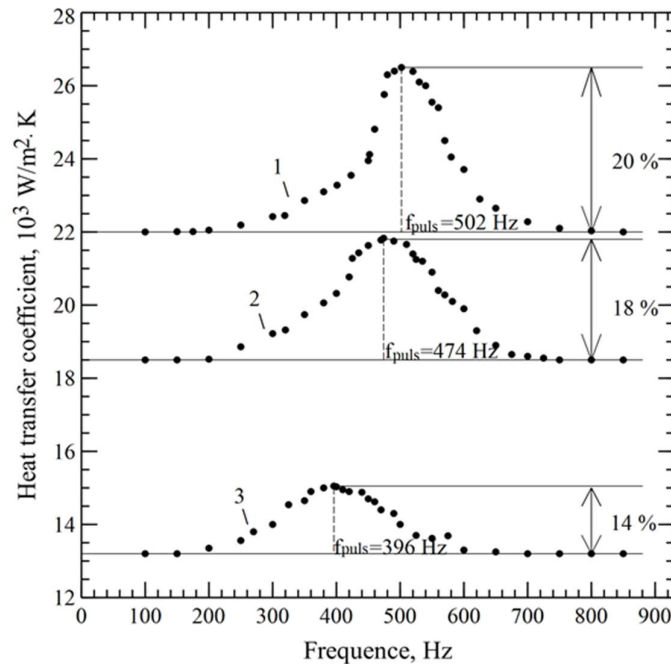


Рис.2. Результаты измерений коэффициента теплопередачи $K_{ТТ}$ коротких ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалья. 1– зависимость $K_{ТТ}$ при перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 20K$ и частоте внутренних пульсаций пара $f_{puls} = 502Гц$; 2– зависимость $K_{ТТ}$ при перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 15K$ и частоте внутренних пульсаций пара $f_{puls} = 474Гц$; 3– зависимость $K_{ТТ}$ при перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 10K$ и частоте внутренних пульсаций пара $f_{puls} = 396Гц$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seryakov A.V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes // Int. J. Heat Mass Transfer Theory and Application 2014, v. 2, N 2, pp. 40-49.

A.V. Seryakov, A.V. Konkin, A.P. Alekseev
 LLC «RUDETRANSSERVICE», Veliky Novgorod

RESONANT VIBRATION INCREASE OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF SHORT LOW-TEMPERATURE HEAT PIPES AT HIGH HEAT LOADS

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук»

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛОСКОМ СЛОЕ ТЕРМОВЕРМИКУЛИТА

Производство и рациональное использование эффективных высокотемпературных теплоизоляционных материалов (ВТИМ) позволяет обеспечить снижение материалоемкости конструкций тепловых агрегатов, непроизводительные теплотери в окружающую среду и общий расход топлива в печах. Одним из перспективных материалов для приготовления ВТИМ является вспученный вермикулит (или термовермикулит), который получают обжигом вермикулитовой руды или концентрата из нее [1].

К свойствам, которые характеризуют термовермикулит как перспективный материал-присыпку при изготовлении ВТИМ, следует отнести: малую насыпную плотность (80-120 кг/м³), низкую эффективную теплопроводность (0,04-0,12 Вт/(м*К) при T = 300 К), сравнительно высокую температуру плавления (огнеупорность до 1430 °С). Кроме того, термовермикулит химически инертен, долговечен и экологически безопасен [2].

При приемке изделий из ВТИМ требуется контроль его коэффициента теплопроводности λ . Данный процесс является затратным по времени и требующий наличия дорогого оборудования. В этой связи, представляет научно-практический интерес разработка методики расчетно-аналитической прогнозной оценки возможной величины λ ВТИМ. При практическом использовании ВТИМ используются в области температур вплоть до 1600 К, а при температурах свыше 600 К доля излучения при передаче теплоты в материале требует учета и с ростом температуры быстро увеличивается. Таким образом, пренебрежение этого явления при расчете эффективного коэффициента теплопроводности ($\lambda_{эфф}$) при высоких температурах может привести к серьезным ошибкам (более 20 %).

Целью работы являлось построение упрощенной модели, описывающей распространение тепла в термовермикулите, объясняющей его теплоизолирующие свойства, а также расчетная оценка отклонения от линейного распределения температуры внутри его образца.

В ходе экспериментальных части исследований был уточнен $\lambda_{эфф}$ термовермикулита разными методами при различных температурах, проверена его устойчивость после нагрева до 1000 °С. В широком диапазоне длин волн (от

(*) А.В. Скурихин, SkurikhinAV@mpei.ru

7500 до 370 см⁻¹ с шагом 1 см⁻¹) были измерены коэффициенты пропускания специально приготовленных образцов, которые применялись для расчета спектральных коэффициентов поглощения α термовермикулита, которые требуются для расчета его $\lambda_{\text{эфф}}$ (в предположении отсутствия рассеяния). Путем усреднения α всего по части указанного диапазона (от 3 до 10 мкм) получен характерный пробег фотона в несколько десятков микрон, что позволяет термовермикулит считать полупрозрачным материалом. Также выполнена оценка погрешности измерений.

Расчетная часть работы проводилась в среде Matlab, получено значение λ термовермикулита при различных граничных условиях [3]. Сделана попытка разделить λ на две составляющие: «истинную» (по-другому, молекулярную или фононную) и «радиационную» (лучистую), которые соответствуют различным механизмам переноса тепла в термовермикулите [4]. Аналитическая часть работы при изучении сложного (радиационно-кондуктивного) теплообмена внутри вермикулита заключалась в усложнении рассмотренных моделей и изменении граничных условий при поиске расчетных значений λ , значительно отличающихся от экспериментальных. Оценивалась также линейность изменения температуры внутри образца термовермикулита в стационарном режиме. Помимо этого, полученные в ходе расчета значения $\lambda_{\text{эфф}}$ оценивали с известными литературными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суворов С.А., Скурихин В.В. Физико-химические исследования и свойства интегрированных высокотемпературных теплоизоляционных материалов // Новые огнеупоры. – 2004. - № 2. – с. 44-52.
2. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П. Вермикулит. Стройиздат, Ленинградское отделение, 1971 - 176 с.
3. Kellet B.S. The Steady Flow of Heat through Hot Glass, Journal of the Optical Society of America, Volume 42, Number 5, May 1952.
4. Сергеев О.А., Мень А.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов М., Издательство стандартов, 1977, 288 с.

A.V. Skurikhin¹, A.V. Kostanovsky^{1, 2}

¹National Research University “MPEI”,

²FSBIS “Joint Institute of High Temperatures of the RAS”

ANALYSIS OF LINEARITY OF TEMPERATURE CHANGES IN THERMOVERMICULITE FLAT LAYER

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ГАЗА В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ ДЕТАНДЕРА ОРЦ-УСТАНОВКИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

Передача энергии газа в виде механической энергии на вал машины происходит при неравномерном поле скоростей в межлопаточных каналах колеса. На первый взгляд, кажется, что это положение находится в противоречии с представлением о струйном течении, которое предполагает равномерное поле скоростей по сечению. Это противоречие устраняется тем, что в основу моделирования турбомшины будем закладывать осредненное одномерное течение. Максимальная плотность тока достигается при критическом режиме течения в узком сечении сопла, чем определяется и наибольший возможный расход газа. Критическими параметрами газа называются параметры, характеризующие состояние газа в узком сечении, в котором при изэнтропийном процессе течения скорость потока равна местной скорости звука.

Существует несколько подходов описания состояния газа. Для идеального газа используется классическое уравнение, основанное на уравнении Менделеева-Клайперона [1, 2]. Для описания состояния реального газа применяют общеизвестные модели состояния Редлиха-Квона [1, 2], Пенга-Робинсона [3], а также доработанные модели Редлиха-Куона [1-4]. Для расчета потока реального газа через проточную часть рабочего колеса и дальнейшего расчета параметров его геометрии применена наиболее полная модель Пенга-Робинсона. 3d-модель проточной части детандера, рассчитанная по разработанной методике, представлена на рис. 1.

Модель является полуэмпирической и использует параметры, полученные графо-аналитическим методом, что является довольно простым в применении на практике и хорошо коррелируется с временными сложными моделями, пригодные к расчету только в производительных программных комплексах (ANSYS, Flowvision). В данных комплексах аналогичные модели включают очень сложные системы дифференциальных уравнений с большим количеством граничных условий и дополнительных функций, но в итоге решение сводится к конечному упрощению системы, подобно описанным и получению визуализированной картины движения газа в межлопаточном канале (рис. 2).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-48-160033».

(*) А.З. Даминов, daminov@list.ru

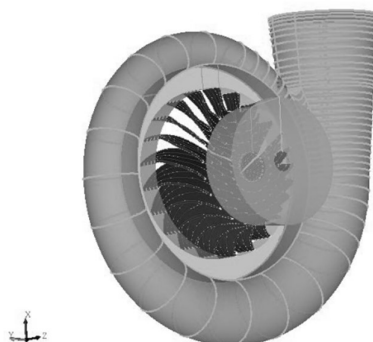


Рис. 1. 3d-модель проточной части детандера ОРЦ-установки

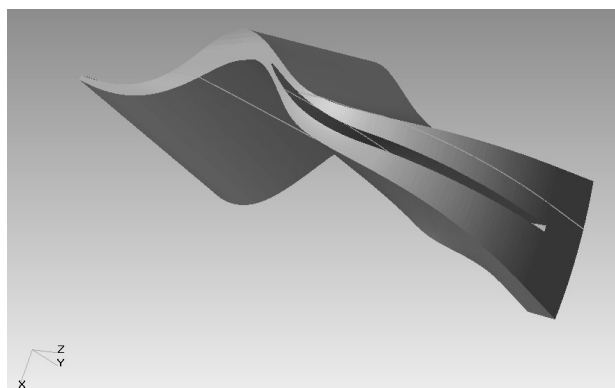


Рис. 2. Пример сектора 3d модели потока газа в межлопаточном канале колеса, разработанного с применением составленной модели

ЛИТЕРАТУРА

1. Рид Р. Свойства газов и жидкостей // Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. М.: Химия, 1982. 592 с.
2. Redlich O., Kwong J.N.S. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions, Chemical Reviews. 44, № 1, pp. 233–244, 1949.
3. Peng D.Y., Robinson D.B. A New Two-Constant Equation of State, Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals, Vol. 15: pp. 59–64, 1976.
4. Aungier R.H. A Fast Accurate Real Gas Equation of State for Fluid Dynamic Analysis Applications, Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, pp. 277-281, 1995.

I.N. Solomin¹, A.Z. Daminov², R.F. Kamalov²

¹ZAO «NPP Compressor»,

²Institute of Power Engineering and Advanced Technologies
of FRC Kazan Scientific Center of RAS

SIMULATION OF GAS FLOW IN THE OPERATING WHEEL OF DETANDER ORZ-UNIT APPLIED IN THE HEATING BOILER ROOM

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Современная энергетика представляет собой сложную инфраструктурную метасистему, в состав которой входят системы электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения. Их инфраструктурная роль заключается в качественном, надежном и доступном энергоснабжении потребителей различных видов деятельности. С увеличением количественного состава технологий (отопление, кондиционирование, электричество, системы охраны и безопасности, водоснабжение, рольставни, электрифицированные шторы и приводы окон, современное аудио- и видеооборудование, системы доставки информации, охранно-пожарной сигнализации и многие другие) усиливается взаимосвязь отдельных систем, растет объем обмениваемой информацией, усложняется управление системами, возрастает риск проявления аномальных ситуаций. Все это обусловило начало процесса цифровизации, интеллектуализации и интеграции энергетических систем.

Новые вызовы времени делают актуальными вопросы создания самоорганизующихся взаимосвязанных энергетических систем с несколькими видами энергоносителей для обеспечения качественного соответствия потребительским запросам в области энергоснабжения, существенного расширения сферы услуг, согласно возросшим и постоянно трансформирующимся требованиям потребителей (уровень комфорта, технологические инновации в производственной сфере и в быту, повышение разнообразия и мощности энергоприемников, радикальные изменения их свойств и др.). Они представляют интеллектуальные, интегрированные энергетические системы (ИИЭС), имеющие многомерную структуру функциональных особенностей и свойств развития, сочетающих многокомпонентность, интеллект, эффективность, надежность, управляемость, гибкое использование технологий преобразования, транспорта, хранения энергии и активного потребления.

Основными драйверами новой технологической парадигмы в энергетике являются:

1. Повышение активности потребителей с функциями потребления, производства и поставки энергии в систему, снижение приоритета централизованного управления и поиск компромиссных решений (изменение роли и места потребителей в системе управления энергоснабжением).

^(*) В.А. Стенников, sva@isem.irk.ru

2. Активное развитие распределенной генерации энергии и формирование идеологии виртуальной электростанции применительно к интегрированным системам электро- и тепло-/хладоснабжения, конкурирующих с крупной генерацией.

3. Появление новых технологий, в частности, «интернета вещей» в виде информационной сети физических объектов («вещей») со встроенными технологиями взаимодействия, минимизирующими участие человека в операционной деятельности.

Эти технологические прорывы становятся мотивирующими факторами инновационного развития энергетики и создают необходимые условия для перехода к технологии функционирования ИИЭС по принципу Интернета, получившей название Энергонет (Energy+network) и лежащей в основе всех «умных» технологий («умные» системы, «умные» сети, «умный» учет и др.).

Процесс интеграции энергетических систем охватывает широкий комплекс вопросов, включая технические и технологические решения, организационные структуры управления такими системами, нормативно-законодательные акты, стандарты и правила, экономические и финансовые механизмы. Из них наиболее подготовленными для реализации представляются технические и технологические аспекты создания интегрированных интеллектуальных систем.

Исследование выполнено в рамках проекта III.17.4.1 № рег. № АААА-А17-117030310432-9 программы фундаментальных исследований СО РАН.

V.A. Stennikov
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences

**DIGITALIZATION AND INTEGRATION - PROSPECTIVE DIRECTIONS
OF ENERGY DEVELOPMENT**

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВТОРИЧНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ И МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ

Введение. Научная новизна и практическая значимость результатов настоящей работы состоит в установлении отличий количества и размеров образующихся вторичных капель при микро-взрывном распаде и столкновениях. Установить такие особенности с использованием современных моделей распада капель крайне сложно [1]. Для развития таких моделей необходимы достоверные экспериментальные данные, на получение которых были направлены проведенные серии опытов. Наименее затратным способом можно считать соударения исходных капель между собой. Целесообразным представляется выполнение сравнительного анализа характеристик вторичного измельчения (размеров и количества) при микро-взрывном распаде, а также при соударениях исходных капель между собой.

Методика экспериментальных исследований. Методика проведения исследований аналогична использованной в [2], однако в настоящей работе основное внимание уделено сравнению характеристик вторичного измельчения при микро-взрывном распаде и столкновениях. Процесс взаимодействия регистрировался при помощи двух высокоскоростных камер (разрешение 1152×864, частота регистрации от 1000 до 5000 кадров в секунду). Две камеры фокусировались в области регистрации для получения пространственной картины взаимодействия капель. Обработка видеофрагментов происходила при помощи программ: Tema Automotive, Photron Fastcam Viewer.

Результаты и обсуждения. Приведенные на рис. 1а распределения по размерам и количеству вторичных капель демонстрируют существенные преимущества использованного подхода на основе микро-взрыва по сравнению со многими другими известными и наименее затратными подходами, заключающимися в применении разных схем вторичного измельчения капель. В частности, на рис. 1б приведены результаты проведенных экспериментов по регистрации характеристик вторичных капель, получаемых при соударениях капель жидкостей между собой.

Заключение. В соответствии с результатами проведенных экспериментов можно сформулировать гипотезу о том, что перспективными для использования в реальных технологиях представляются системы этапного измельчения капель за счет их соударений между собой, со стенками камер, а также перегревом до

^(*) П.А. Стрижак, pavelspa@tpu.ru

условий микро-взрывного распада. В таком случае можно получить отношения площадей S/S_0 выше 50.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ (проект № 18-71-10002).

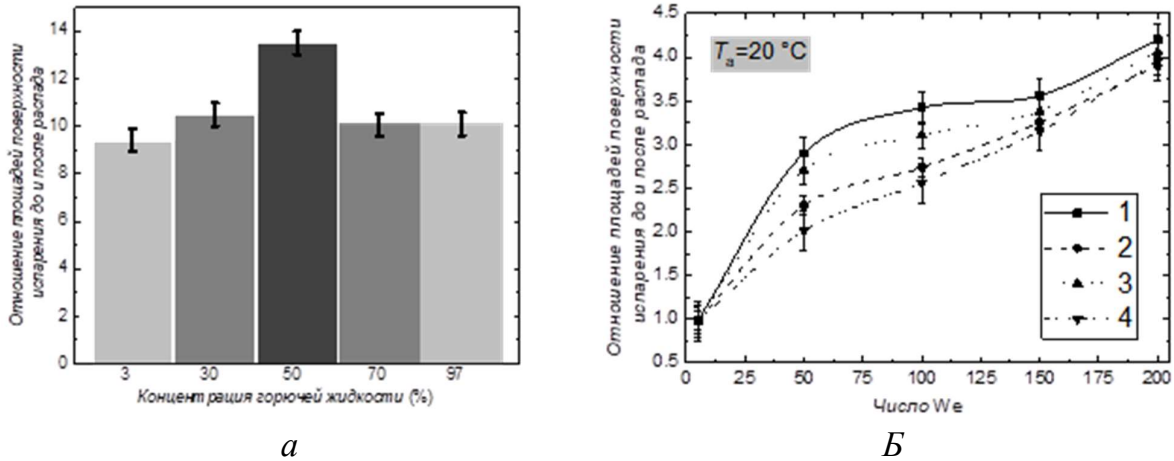


Рис. 1. Отношение площадей поверхности испарения до и после распада: *а* – при микро-взрыве (капля воды с добавлением масла, 15 мкл, 350 °С, 2 м/с); *б* – при столкновениях (1 – перемешанные капли (70 % воды – 30 % масла); 2 – перемешанные капли (70 % воды – 30 % масла); 3 – капли масла; 4 – капли воды)

ЛИТЕРАТУРА

1. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Aziz A.R.B.A., A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. P. 815–821.
2. Volkov R.S., Strizhak P.A. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using Planar Laser-Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry // Exp. Therm. Fluid Sci., 2018. V. 97. P. 392–407.

P.A. Strizhak, D.V. Antonov, R.M. Fedorenko
National research Tomsk polytechnic university

COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF CHILD-DROPLETS AT THE COLLISIONS AND DURING MICRO-EXPLOSION

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ТЕЛА НА КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И
ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЕРМИЧЕСКОМ СЛОЕ**

Рассматривается влияние формы тела на колебания температуры и упругие термоциклические напряжения в термическом слое на примере тел простой геометрической формы – полупространства, пластины, цилиндра, пространства с цилиндрическим каналом, шара и пространства со сферической полостью. Для каждой области решается несвязанная циклическая квазистатическая задача термоупругости без начальных условий. Поле температуры удовлетворяет обобщенному уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{1}{\eta^m} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta^m \frac{\partial T}{\partial \eta} \right), \eta \in l_\eta, t > -\infty;$$

условию периодичности

$$T(\eta, t + \mathcal{T}) = T(\eta, t), \eta \in l_\eta, t > -\infty;$$

условию симметрии или ограниченности решения для ограниченной области

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial \eta} = 0, t > -\infty,$$

условию на бесконечности для частично ограниченной области

$$\lim_{\eta \rightarrow +\infty} \left(\eta^m \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) = 0, t > -\infty;$$

одному из трех граничных условий на поверхности области:

граничному условию I рода

$$T(\eta_w, t) = T_w, t > -\infty,$$

граничному условию II рода

$$-\chi \lambda \frac{\partial T(\eta_w, t)}{\partial \eta} = q_w, t > -\infty,$$

граничному условию III рода

$$-\chi \lambda \frac{\partial T(\eta_w, t)}{\partial \eta} = \alpha [T(\eta_w, t) - T_f], t > -\infty.$$

Здесь $T = T(\eta, t)$ – температура области, К; η – пространственная координата, м; t – время, с; l_η – совокупность внутренних точек области: для полупространства $l_\eta = (0, +\infty)$, для пространства с цилиндрическим каналом и пространства со сферической полостью $l_\eta = (R, +\infty)$, для пластины, цилиндра и шара $l_\eta = [0, R)$; R – половина толщины пластины, радиус цилиндрической или сферической поверхности, м; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; $t = 0$ – для

^(*) М.И. Супельняк, max2901@mail.ru

полупространства и пластины; $m = 1$ – для цилиндра и пространства с цилиндрическим каналом; $m = 2$ – для шара и пространства со сферической полостью; T – период цикла, с; T_w – температура поверхности, К; q_w – плотность теплового потока через поверхность, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); T_f – температура жидкости, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); $\chi = 1$ – для ограниченных областей; $\chi = -1$ – для частично ограниченных областей; $\eta_w = 0$ – для полупространства; $\eta_w = R$ – для остальных областей.

Задача теории упругости решается в перемещениях. Поле перемещения удовлетворяет уравнению равновесия в перемещениях

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{\eta^m} \frac{\partial(\eta^m u)}{\partial \eta} \right] = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \beta \frac{\partial \theta}{\partial \eta}, \eta \in l_\eta, t > -\infty;$$

кинематическому условию для ограниченной области

$$u(0, t) = 0, t > -\infty,$$

кинематическому условию для частично ограниченной области

$$\lim_{\eta \rightarrow +\infty} u = 0, t > -\infty;$$

силовому условию свободной поверхности

$$(1 - \nu) \frac{\partial u(\eta_w, t)}{\partial \eta} + m\nu \frac{u(\eta_w, t)}{\eta_w} = (1 + \nu)\beta\theta(\eta_w, t).$$

Здесь $u = u(\eta, t)$ – перемещение вдоль координаты η , м; $\theta = T - \langle T \rangle$ – избыточная температура, К; $\langle T \rangle = \text{const}$ – средняя за период температура области, К; ν – коэффициент Пуассона; β – коэффициент линейного термического расширения, К⁻¹. Компоненты тензора напряжений определяются с помощью соотношений Коши и закона Дюамеля-Неймана.

Задача термоупругости приводится к безразмерному виду, а ее решение ищется в виде тригонометрических рядов Фурье по времени. Для каждой области определяются коэффициенты рядов. С помощью полученных решений для каждой области устанавливаются параметры, при которых термический слой в ней можно считать плоским.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00090.

M.I. Supel'nyak
Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)

**EFFECT OF THE SHAPE OF SOLID ON
OSCILLATIONS OF TEMPERATURE AND
THERMOCYCLIC STRESSES IN THERMAL LAYER**

**О ВЫБОРЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕТЕРОГЕННОГО
ОКИСЛЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Как показывают многочисленные исследования [1], водоугольное топливо (ВУТ) является одним из наиболее перспективных энергоносителей в ближайшем и отдаленном будущем. На основании анализа немногочисленных результатов математического моделирования [2] зажигания и горения капель ВУТ можно сделать вывод, что главной объективной причиной слабой внедрённости водоугольного топлива в энергетике является недостаточная проработанность физического описания и математической базы процессов зажигания капель водоугольного топлива. На настоящее время проведенные ранее исследования не рассматривали в качестве основной задачи оценку влияния кинетической схемы газофазных и гетерогенных реакций окисления газообразных продуктов пиролиза на результат математического моделирования процесса зажигания капель ВУТ.

При проведении математического моделирования за базовую принята модель, которая по своей постановке и основным методам решения соответствует модели приведенной в [3].

На рисунке 1 приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования значения времен задержки зажигания частицы водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля. На графиках: 1 – время задержки зажигания кокса; 2 - время задержки воспламенения летучих, полученное по результатам численного моделирования; 3 – экспериментальные значения времен задержки воспламенения. Анализ теоретических и экспериментальных значений t_{ign} показал их хорошее соответствие.

На рисунке 2 приведены значения безразмерных времен задержки воспламенения (ζ) от безразмерной температуры внешней среды (Θ).

$$\zeta = \frac{|t_{ign} - t_{ign}^0|}{t_{ign}^0} \quad \Theta = \frac{T_g}{1473}$$

где: t_{ign}^0 – время задержки зажигания частицы водоугольного топлива рассчитанное, при использовании кинетической схемы окисления углерода [4]. t_{ign} – время задержки зажигания, полученное по результатам численного моделирования с учетом упрощённой кинетической схемы термохимического реагирования угля с кислородом:

^(*) С.В. Сыродой, ssyrodoy@yandex.ru

Схема 2 $C+O_2=CO_2+32.8 \text{ MJ/kg}$; $2C+O_2=2CO+18.4 \text{ MJ/kg}$

Схема 3 $C+O_2=CO_2+32.8 \text{ MJ/kg}$

Сравнительный анализ времен задержки воспламенения показывает, что выбор «упрощенной» кинетической схемы не оказывает существенного влияния на конечный результат математического моделирования процесса гетерогенного зажигания частицы ВУТ. Величина значений ζ не превышает 0,06. Это, скорее всего, обусловлено подавляющим доминированием реакции окисления углерода кислородом ($C+O_2=CO_2$) над остальными.

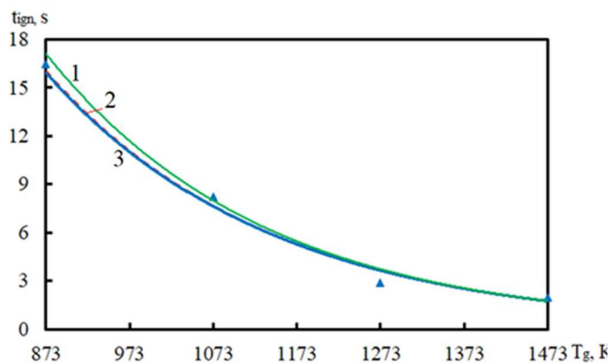


Рис. 1. Зависимость времен задержки воспламенения капель водоугольного топлива от температуры внешней среды

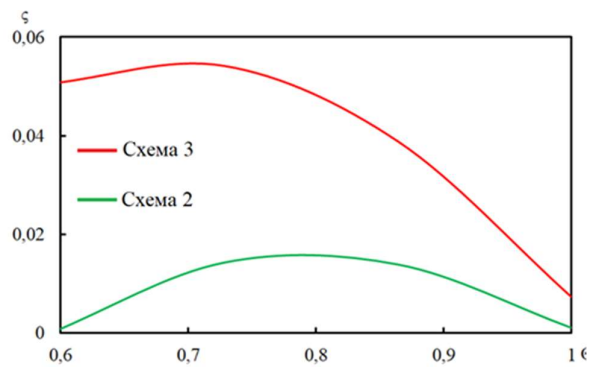


Рис. 2. Зависимость безразмерной задержки зажигания ζ от безразмерной температуры внешней среды Θ

ЛИТЕРАТУРА

1. Longwell J.P., Rubin E.S., Wilson J. Coal: Energy for the future//Progress in Energy and Combustion Science, 1995. V. 21. P. 269-360.
2. Kijo–Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions//Fuel. 2011. V. 90. P. 865-877.
3. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles//Combustion and Flame. 2019. V. 203. P. 375–385.
4. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. Изд-во Моск. ун-та, 1957. — 452 с.

S.V. Syrodoy
National Research Tomsk Polytechnic University

ABOUT THE CHOSEN OF THE KINETIC MODEL OF COAL-WATER FUEL PARTICLES

Е.Ю. Темникова^{1, (*)}, А.Р. Богомолов^{1, 2}, Д.М. Косарев¹
¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

ТОПЛИВНЫЕ БРИКЕТЫ ИЗ ШЛАМОВ (КЕКА) ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

Значительная доля добываемого угля обогащается с образованием высокозольных отходов, масса которых на сегодняшний день оценивается миллионами тонн. Многие отходы углеобогащения являются потенциальным топливом, хотя и низкокачественным, с точки зрения теплотворной способности. Шламоотстойники и гидроотвалы занимают большие территории, выводят земли из хозяйственного оборота, загрязняют окружающую среду, и при этом омертвляется часть капитала, вложенного в добычу и переработку угля, к тому же уголь, находящийся в шламах, окисляется [1]. Утилизация отсевов, шламов, отходов углеобогащения является одной из приоритетных задач, как для отдельных обогатительных фабрик, так и для угледобывающих регионов в целом. Особенно это актуально для Кузбасса как одного из самых крупнейших эксплуатируемых угольных месторождений мира.

В связи с этим выявление закономерностей процессов отверждения пластичной обводненной угольной массы кека при введении связующего и влагоотнимающего агента в соотношении, достаточном для первичного придания устойчивой формы и дальнейшего набора прочности без термической сушки, является актуальным направлением исследований.

Условием отнимания влаги из кека (шлама) является превышение капиллярного давления в отнимающем компоненте при соприкосновении с влагой кека. Наиболее приемлемым водоотнимающим средством может служить опил и щепа, являющиеся отходами деревообрабатывающей промышленности. Радиус пор в древесине составляет в среднем 10 мкм [2]. Таким образом, при введении древесины в шлам, капиллярное давление у которой превышает практически на порядок капиллярное давление кека, будет происходить отдача влаги от кека древесной структуре. При этом общая влажность незначительно уменьшается, но кек из пластического липкого вида переходит в состояние, пригодное для создания недеформируемой формы.

Исследования показали, что в состав топливного брикета должны входить 8-14% древесных опилок, остальной объем – шлам влажностью 38-43%, что достаточно для достижения механической прочности более 97% в течение 24 часов после брикетирования без применения термической сушки.

(*) Е.Ю. Темникова, teu.pmahp@kuzstu.ru

Полученные брикеты были подвергнуты испытаниям на замерзание и размораживание, которые показали, что брикеты сохранили форму, расколов и растрескивания по поверхности не наблюдалось, т.е. брикеты можно хранить и транспортировать в зимнее время года. Исследования на водопоглощение показали, что брикеты не рекомендуется подвергать прямому воздействию воды, т.е. хранить и транспортировать под искусственным навесом.

Последним этапом исследований являлось изучение горения брикетов в открытом пространстве и в бытовой печи (муфеле). В муфеле задержка зажигания составила 3 мин, а на открытом пространстве – 10 мин. Муфель бытовой печи позволил поддерживать повышенную температуру в объеме в отличие от горения на открытом воздухе – только с нижней (подовой) площади горения древесины. Процесс горения с видимыми пламенами в обоих случаях продолжался не более 45 мин. Дальнейшее окисление происходило без пламени, но с выделением теплоты не менее 8 ч. Брикеты после открытого горения сохранили начальную форму даже при незначительном сдавливании, в то время как брикеты, подвергнутые горению в муфеле (бытовой печи), подвергаются разлому при незначительном прикосновении.

Среднее значение остатка углерода составляет для брикета (в муфеле) – 4,0%; при открытом горении – 4,7%. Наиболее полное сгорание углеродсодержащего материала происходит в муфеле (бытовой печи).

Рассев по гранулометрическому составу показал, что в золе брикетов, подвергнутых горению в муфеле, преобладает крупная фракция по сравнению с сжиганием в открытом пространстве. Полагаем, что органическая присадка в виде опиловки древесины содержит элементы плавни Na и K, которые в процессе повышенных температур (в муфеле) образуют друзы, т.е. происходит спекание зольных частиц в более крупные.

К преимуществам топливных брикетов можно отнести доступность, низкую стоимость вводимого компонента и получение механической прочности брикета не ниже 97%. Изготовление таких брикетов можно производить по схеме прессования в экструдерах или в валковом прессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серегин, А.И. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №5. – С. 241-244.
2. Чудинов, Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. –269 с.

E.Yu. Temnikova¹, A.R. Bogomolov^{1,2}, D.M. Kosarev¹

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

FUEL BRIQUETTES FROM SLIMES (CAKE) OF CONCENTRATING MILL

Е.Ю. Темникова^{1, (*)}, А.Р. Богомолов^{1, 2}, А.А. Лапин¹
¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

ФИЛЬТРУЮЩИЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ЗОЛЫ УНОСА ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Угольная генерация в Кузбассе занимает ведущее место по сравнению с другими видами используемого топлива и высокотемпературные процессы переработки углей в пылеугольных котлах вносят значительную долю загрязнений в окружающую среду в виде золошлаковых отходов. Группа компаний Кузбасского филиала Сибирской генерирующей компании в Кузбассе ежегодно производит вывоз около 1,4 млн. тыс. т золошлаковых отходов в регламентированные золоотвалы. Эти золошлаковые отходы содержат на 80% золу уноса [1] по массе от общего вывоза. Назревшая проблема требует решений, новых прорывных технологий утилизации золошлаковых отходов как в местах их образования, так и при извлечении накопленных за десятилетия таких отходов. Препятствием на пути повышения потребительских свойств золы является отсутствие ее фракционирования. К примеру, немагнитная часть золы уноса угольной генерации, содержащая от 45 до 60% оксидов кремния (SiO_2) и от 15 до 20% оксидов алюминия (Al_2O_3) [2] может служить ценным минеральным сырьем для производства фильтрующих и теплоизоляционных элементов.

Целью работы является получение образцов фильтрующих и теплоизоляционных элементов из золы уноса и определение их свойств.

В качестве рабочего вещества была взята зола уноса Кемеровской ГРЭС, из которой выделили микросферы и магнитную часть, представляющие определенную ценность в других отраслях промышленности. Для получения фильтрующих элементов оставшуюся немагнитную часть золы уноса разделили на три фракции 0-50, 50-80 и 80-1000 мкм. Анализ химического состава каждой фракции показал, что с увеличением класса крупности количество кислотных оксидов (Al_2O_3 и SiO_2) не значительно уменьшается, и все три фракции могут быть использованы для получения фильтрующих элементов.

Несколько навесок каждого класса крупности поместили в муфельную печь и путем термической обработки в ней при температуре 1120°C, (температуре спекания частиц золы на основе показателей плавкости золы) получили образцы, форму которых механически довели до цилиндрической.

(*) Е.Ю. Темникова, teu.pmahp@kuzstu.ru

Для фильтрующих элементов определяли гидравлическое сопротивление, а для теплоизоляционных элементов – теплоемкость, плотность, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности.

Для фильтрующего элемента из фракции 0-50 мкм продувка воздухом не была осуществлена ввиду очень большого сопротивления, т.е. фильтр состоит из очень мелких и непроницаемых пор. Фильтры из частиц 50-80 и 80-1000 мкм имеют проходную пористую структуру, и у элемента из золы 80-1000 мкм капилляры большего диаметра. Гидравлическое сопротивление для фильтра из частиц 50-80 мкм составило 34,2-50 кПа при расходе воздуха 0,4-0,75 м³/ч, а для фильтра из частиц 80-100 мкм, соответственно, 4,6-19,6 кПа при 0,5-2,2 м³/ч. Можно предположить, что фильтрующие элементы из немагнитной части золы уноса будут работать как фильтры с адсорбционными свойствами. Необходимо провести испытания фильтрующих элементов по определению степени очистки отработанного трансформаторного масла, ресурса фильтров и возможности их регенерации за счет прокаливания.

Теплоизоляционные элементы, как и фильтрующие имеют пористое строение, поэтому теплофизические свойства, к примеру, такие как коэффициент теплопроводности, являются условными.

В результате испытаний элементов, проводимых при температурах от 25 до 151°С, были получены в среднем следующие значения их теплофизических свойств: плотность 0,970-0,994 г/см³, теплоемкость 580-775 Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности 0,26-0,33 Вт/(м·К) и коэффициент температуропроводности 4,45-4,30·10⁻³ см²/с. Такие теплоизоляционные элементы из золы, которые можно использовать при температурах до 900°С, могут занять свою нишу несмотря на то, что принято считать теплоизоляционными материалами материалы с λ менее 0,25 Вт/(м·К).

ЛИТЕРАТУРА

1. Утилизация отходов производства предприятий энергетики Кузбасса. Проблемы и перспективы / А.И. Копытов, Ю.В. Антонов // Вестник КузГТУ. 2013. № 3. С. 62-64.
2. Сысолятин, А.С. Подход к фракционированию золошлаковых отходов Кемеровской ГРЭС / А.С. Сысолятин, И.А. Звингул, К.Ю. Ушаков, Л.Ю. Беляевская, Е.Ю. Темникова // Сб. лучших статей VIII Всерос. 61 науч.-практ. конф. молодых ученых «Россия Молодая», Кемерово, 19-22 апр. 2016. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2016. С. 452-6.

Е.Yu. Temnikova¹, A.R. Bogomolov^{1,2}, A.A. Lapin¹
¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

FILTERING AND THERMAL INSULATING ELEMENTS OF FLY ASH AT HEAT AND POWER PLANTS

ТЕПЛООБМЕН В ВЫСОКОТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

К настоящему времени выполнено большое исследований ламинарных и турбулентных пограничных слоев в условиях повышенной турбулентности набегающего потока в каналах, изложенных в монографиях и обзорных статьях [1-5]. В большинстве работ в качестве турбулизаторов использовались бипланарные решетки и перфорированные пластины. За ними на некоторых расстояниях создавалась однородная и изотропная турбулентность с уровнем турбулентности не более 10%. Как отмечено в [6,7], основное влияние внешней турбулентности на турбулентный слой проявляется в процессе «берстинга» в вязком подслое ($y^+ < 100$), где имеет место основное производство турбулентной энергии. Это приводит к более сильному воздействию внешней турбулентности на теплообмен по сравнению с трением. Тем не менее, для указанных выше генераторов турбулентности их интенсифицирующее влияние на трение и теплообмен в пограничном слое не превосходит 10-15 %. Более сильное влияние получено в [8] для струйного генератора турбулентности, в котором по периметру рамки с определенным шагом перекрестно вдувались струи воздуха. Но наиболее сильный эффект отмечен в [9,10] для свободной струи, хотя в ней отмечается неизотропность турбулентности. Интересно, что для ламинарных пограничных слоев в ряде статей (например, в [7]) отмечалось, что внешняя турбулентность в переходном режиме вместо неустойчивости Толлмина-Шлихтинга, характерной для естественной турбулентности, вызывает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, что и приводит к так называемому верхнему «байпасному» переходу [5,11].

При использовании для защиты поверхностей от разрушительного влияния высокоэнтропийных потоков пористых и щелевых завес высокие пульсации в основном течении существенно ухудшают их эффективность. Также в сильнотурбулизированных потоках снижаются защитные свойства вдува в условиях до и - сверхзвукового режимов течения [12].

В исследованиях отрывных течений показано, что турбулентность набегающего потока оказывает на них более заметное влияние, чем на пограничные слои. При этом она не скоррелирована с высокой турбулентностью, индуцируемой в сдвиговом слое отрывного потока [13-15]. В докладе дан анализ характеристик отрывных течений за различными, в основном единичными преградами при повышенной внешней турбулентности.

^(*) В.И. Терехов, terekhov@itp.nsc.ru

Немалый интерес представляет изучение отрывного течения в условиях высокой турбулентности при обтекании поперечного цилиндра, а также при горении в пограничном слое. Эти вопросы подробно обсуждаются в докладе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-19-00161).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. Киев: Наукова думка, 1985. 296 с.
2. Blair M.F. Influence of free-stream turbulence on turbulent boundary layer heat transfer and mean profile development, part II-Analysis of the results// J. Heat Transfer. 1983. P. 41.
3. Simonich J.C., Bradshaw P. Effect of free-stream turbulence on heat transfer through a turbulent boundary layer // J. Heat transfer, 1978. Vol. 100, № 4. P. 671-677.
4. Hancock P.E., Bradshaw, P. The effect of free-stream turbulence on turbulent boundary layers // J. Fluid Engng., 1983. Vol. 105. P. 284-289.
5. Peneau F., Boisson H.C., Djilali N. Large eddy simulation of the influence of high free-stream turbulence on a spatially evolving boundary layer // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2000. Vol. 21. P. 640-647.
6. Kestin J., Maeder P.F., Wang H.E. Influence of turbulence on the transfer of heat from plates with and without a pressure gradient // Int. J. Heat Mass Transfer, 1961. No 3. P. 133.
7. Kondjoyan A., Peneau F., Boisson H.C. Effect of high free stream turbulence on heat transfer between plates and air flows: a review of existing experimental resultants // Int. J. of Thermal Sciences, 2002. Vol. 41. P. 1-16.
8. Young C.D., Han J.C., Huang Y., Rivir R.B. Influence of jet-grid turbulence on a flat plate turbulent boundary layer flow and heat transfer // J. Heat Transfer, 1992. P. 65-72.
9. Maciewski P.K., Moffat R.J., Heat transfer with very freestream turbulence: Part I- Experimental data // J. Heat Transfer, 1992. Vol. 114. P. 827-833.
10. MacMullin R., Elrod W., Rivir R.B. Free-stream turbulence from a circular jet on flat plate heat transfer and boundary layer flow // J. Turbomachinery. 1989. Vol. 111. P. 78-86.
11. Эпик Е.Я., Григоренко В.А. Heat transfer at occurrence of the bypass transition // Proc. of the 2nd Russian Nation. Conf. on Heat Transfer. М. 1998. Vol. 2. P. 278-281.
12. Lebedev V.P., Lemanov V.V., Terekhov V.I. Film-cooling efficiency in a Laval nozzle under conditions of high freestream turbulence // J. Heat Transfer, 2006. № 6. P. 571-579.
13. Terekhov, V.I., Yarygina, N.I., Zhdanov, R.F., Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. P. 4535.
14. Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Смутьский Я.И. Обтекание системы из нескольких ребер в условиях высокой турбулентности // Т и А, 2006. № 3. С. 361 - 368.
15. Дьяченко А.Ю., Терехов В.И., Ярыгина Н.И. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками // ПМТФ, 2007. № 4. С. 23.

V.I. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

HEAT TRANSFER IN HIGH-TURBULENT FLOWS OF POWER PLANTS. STATE OF THE PROBLEM

В.А. Тимофеев¹, С.С. Смоленцев¹, Д.Н. Васильев¹,
А.А. Моисеев², П.Г. Смирнов², А.С. Борейшо^{1,2}, А.В. Савин^{1,2, (*)}
¹АО «Лазерные системы»,
²БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ПРАКТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Выращивание изделий из металлических порошков методом селективного лазерного сплавления (SLM) открывает широкие возможности создания легких и прочных конструкций, невыполнимых традиционными методами. Жаропрочные сплавы по сравнению с обычными конструкционными сталями имеют пониженную теплопроводность, что является причиной целого ряда сложных теплофизических явлений. Поскольку получаемые таким способом изделия предназначены для работы в экстремальных условиях (высокие температуры и силовые нагрузки), необходимо глубокое понимание этих явлений.

Одна из особенностей рабочих процессов аддитивных технологий на основе металлических порошков – это чрезвычайно широкий диапазон пространственных масштабов, простирающийся от долей размера частицы порошка (единицы мкм) до размеры выращиваемого изделия. Это обстоятельство предъявляет специфические требования к математическим моделям и численным методам.

В работе рассматривается архитектура иерархически организованной системы моделей разных пространственных масштабов, связанных между собой. Модель микро-уровня описывает поглощение энергии лазерного излучения в случайно-неоднородной структуре слоя частиц порошка, плавление частиц и подложки, конвекцию расплава и кристаллизацию жидкой ванны, испарение, лучистое и конвективное охлаждение, возможное образование пор, причем все это происходит на фоне температурного поля, сформированного всей историей выращивания изделия до текущего момента. Модель мезо-уровня описывает теплопередачу от движущейся вместе с лазерным пятном микро-ванны расплава к массиву выращиваемого изделия. Модель макро-уровня описывает температурное поле и поле напряженно-деформированного состояния, развивающееся во времени, включая возникновение дефектов из-за разрушений под действием термических напряжений.

Приведены некоторые результаты моделирования, иллюстрирующие картину рабочего процесса на разных масштабах.

(*) А.В. Савин, izooandrey@inbox.ru

Подобные сложные модели по необходимости включают много эмпирической информации, и поэтому нуждаются в тонкой настройке в процессе сопоставления с результатами физического эксперимента на действующем оборудовании.

В работе приводятся и обсуждаются результаты такого сопоставления с реальным рабочим процессом, проводимым на установке M250 [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Установка аддитивного селективного лазерного сплавления M250 производства компании «Лазерные системы», <http://www.lsystems.ru/products/9/381/>

V.A. Timofeev¹, S.S. Smolentsev¹, D.N. Vasiliev¹,
A.A. Moiseev², P.G. Smirnov², A.S. Boreysho^{1,2}, A.V. Savin^{1,2}
¹Laser Systems Ltd,
²Baltic State Technical University “Voenmeh”

THERMOPHYSICAL PHENOMENA IN ADDITIVE TECHNOLOGIES AT GROWING PARTS FROM HIGH-TEMPERATURE ALLOYS: PRACTICE AND SIMULATION

В.Г. Тонконог^(*), А.Л. Тукмаков, Н.А. Тукмакова,
З.Р. Акбиров, В.И. Ваньков
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМО- И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

В энергетике сжиженный природный газ (СПГ) признаётся перспективным энергоносителем в обозримом будущем [1-3]. Себестоимость природного газа значительно ниже себестоимости нефтепродуктов. Поэтому мировое потребление природного газа растёт более высокими темпами по сравнению с другими энергоносителями. В России и за рубежом проводится активная работа по использованию природного газа на различных типах наземного и водного транспорта. Оптимальная стратегия использования СПГ предполагает его транспортировку и хранение в жидком состоянии и газификацию при подаче в энергоустановки.

Для регазификация СПГ применяются следующие методы: внешний подвод энергии к рабочему телу в форме тепла или работы; использование внутренней энергии жидкости; комбинированное воздействия с использованием внутренней энергии жидкости и внешнего подвода энергии. Внешний подвод тепла с использованием теплообменников, в том числе и атмосферных, обеспечивает высокие технико-экономические характеристики газификаторов в режимах постоянной производительности по газу.

Регазификация СПГ путем использования внутренней энергии жидкости может быть осуществлена в процессе её адиабатного расширения из состояний, лежащих выше левой пограничной кривой, в двухфазную область состояний. Технологическая схема, реализующая такой метод, представлена в [4]. Поскольку образование паровой фазы, согласно технологической схеме [4], происходит за счёт убыли внутренней энергии жидкости, то такой метод позволяет наряду с получением газа, обеспечивать и охлаждение СПГ в ёмкости-хранилище. Недостатком рассмотренного способа является то, что паровая среда после сепаратора будет иметь низкую температуру, что может потребовать дополнительного подогрева газа.

Более широкими возможностями и универсальностью обладает способ комбинированного воздействия, предлагаемый в [5]. При реализации такого способа в регазификаторе поэтапно осуществляются следующие процессы: нагрев жидкости в теплообменнике до температуры, не допускающей её

^(*) В.Г. Тонконог, tonkonogvg@yandex.ru

испарения; адиабатное расширение жидкости в дроссельном устройстве с образованием дисперсного парожидкостного потока; подача дисперсного двухфазного потока в теплообменник-испаритель и подвод тепла к парожидкостному потоку теплообменника до полного испарения жидкой фазы. Такой способ регазификации СПГ позволяет, практически, исключить кризисные явления, возникающие при кипении жидкости в тракте теплообменника, и может применяться в установках, работающих в режимах динамических нагрузок.

Выполнено численное моделирование характеристик регазификатора, включающее расчёт пропускной способности дроссельного устройства, в котором осуществляется течение СПГ с образованием двухфазного потока, структуры двухфазного потока в тракте дроссельного устройства. Предложены конструктивные схемы теплообменника-испарителя, выполненные по схеме «труба Фильда» – труба в трубе. Представлены расчёты эволюции закрученного двухфазного потока в теплообменнике-испарителе с учётом процессов коагуляции и дробления дисперсной фазы парожидкостного потока.

Полученные результаты численного моделирования процесса регазификации СПГ могут быть использованы при проектировании регазификаторов и определении их эксплуатационных характеристик.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан (проект № 18-48-160017).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовк В.С., Новиков А.И., Глаголев А.И. и др. Мировая индустрия и рынки сжиженного природного газа: прогнозное моделирование. М.: Газпром Экспо, 2009. 321 с.
2. Горбачев С.П., Попов В.П., Самсонов Р.О. Современные технологии производства и использования СПГ в качестве газомоторного топлива // Технические газы, 2006. № 3. С. 44-47.
3. Удут В.Н. Криогенная техника и технологии для малотоннажного производства и использования СПГ на транспорте и для автономной газификации // Газовая промышленность, 2011. Спецвыпуск (668). С. 16-19.
4. Тонконог В.Г., Арсланова С.Н. Система подачи криогенного топлива в энергетическую установку. Патент РФ на изобретение № 2347934, Оpubл. 27.02.2009. Бюл. 6.
5. Тонконог В. Г., Тукмакова Н. А., Тукмаков А. Л. Способ регазификации жидкости и установка для регазификации жидкости. Заявка на изобретение № 2018123646 от 28.06.2018.

V.G. Tonkonog, A.L. Tukmakov, N.A. Tukmakova, Z.R. Akbirov, V.I. Vankov
FSBEI HE «KNRTU–KAI»

SIMULATION OF THERMO- AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE LIQUEFIED NATURAL GAS REGASIFICATION SYSTEMS

НИЗКОЭМИССИОННЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ СЛАНЦЕПЕРЕРАБОТКИ, МЕТАЛЛУРГИИ И НЕФТЕХИМИИ

В ОАО «ВТИ» и ENTEN Engineering AS накоплен большой опыт в проектировании горелок для сжигания газообразных побочных продуктов сланцепереработки, металлургии и нефтегазовых комплексов. Горелки предназначены для сжигания горючих газов, теплота сгорания и состав которых меняются при работе в достаточно широких пределах.

Эффективное сжигание газов непостоянного состава и теплоты сгорания обеспечивается особенностями конструкции горелок. В центральной части организовано сжигание 5 – 10% горючего газа в закрученном потоке чистого воздуха, а остальная часть газа сжигается в периферийной части горелки в потоке воздуха и дымовых газов рециркуляции. Подвод газа в периферийную часть выполняется через несколько газораздаточных труб с газораспределительными соплами на концах, а поток воздуха и дымовых газов в периферийной части может быть как прямым, так и закрученным в зависимости от требований к форме факела в конкретной топке. Факел в центральной части играет роль «пилотной» горелки и обеспечивает стабильное зажигание газа в периферийной части при значительных колебаниях состава и теплоты сгорания газа, а также при экстремально высоком балластировании воздуха дымовыми газами рециркуляции, в частности, с целью понижения выбросов оксидов азота.

Важнейшим критерием правильности решений, заложенных при проектировании горелок, остаются испытания головных образцов в реальных условиях и их длительная эксплуатация на промышленных объектах.

Для сжигания продуктов сланцепереработки были спроектированы, испытаны и введены в эксплуатацию горелки трех типов.

Горелки EE-G16/1, с регулируемым перераспределением воздуха по сечению горелки, тепловой мощностью 16 МВт, сжигающие полукоксовый газ сланцепереработки на котлах БКЗ-75-39, успешно работают на электростанции VKG ENERGIA OÜ с 2013 г. Шесть горелок EE-G19/2 с независимым регулированием расхода газа и воздуха в центральную и периферийную часть и с подачей дымовых газов рециркуляции в периферийный воздух, тепловой мощностью 20 МВт каждая, в 2014г. установлены на котле ТП-101 Эстонской ЭС предприятия EESTI ENERGIA AS. Шесть двухтопливных (полукоксовый +

(*) В.Т. Сидоркин, vladimir@enteh.ee

генераторный газ) горелок EE-G20/2 тепловой мощностью по 20 МВт с регулируемой подачей дымовых газов рециркуляции в периферийную часть работают на котле E-135-3,2-420ДГ ЭС сланцеперерабатывающего комбината в г. Кохтла-Ярве, входящей в состав фирмы VKG ENERGIA OÜ, с 2017г.

Результаты испытаний головных образцов наиболее универсальных горелок EE-G20/2 на котле E-135-3,2-420ДГ ЭС сланцеперерабатывающего комбината в г. Кохтла-Ярве, показали, что уровень выбросов NO_x соответствует современным европейским нормам (100 мг/нм^3 при $\text{O}_2=3 \%$) и заметно ниже действующих российских норм (125 мг/нм^3 при $\text{O}_2=6 \%$) [1].

Показатели по оксидам азота достигаются только за счет внутритопочных (первичных) мероприятий без применения систем каталитической или некаталитической очистки дымовых газов. Отдельные эксперименты показали также, что при работе с повышенными расходами дымовых газов рециркуляции в периферийный воздух горелок достижимы концентрации NO_x в уходящих газах около 50 мг/нм^3 без организации ступенчатого сжигания топлива [2].

Следует отметить, что разработанные низкоэмиссионные горелки могут быть использованы и для сжигания других нестандартных газовых топлив, образующихся, например, на предприятиях металлургии (коксовый и доменный газы), нефтепереработки (пиролизные газы) и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугов, А.Н. Мероприятия для снижения выбросов оксидов азота на котле E-135-3,2-420ДГ при сжигании газообразных продуктов сланцепереработки /А.Н. Тугов, В.А. Верещетин, В.Т. Сидоркин и др. //Электрические станции. – 2018. - №5. – С. 46-49.
2. Сидоркин В.Т. Образование оксидов азота при сжигании пиролизных газов в воздухе, сильно забалластированном дымовыми газами рециркуляции /В.Т. Сидоркин, А.К. Берсенева, А.Н. Тугов, В.А. Верещетин // Теплоэнергетика. – 2019. - №1. – С. 65-74.

A.N.Tugov¹, V.T. Sidorkin², K.G.Bersenev², V.A.Vereschetin¹
¹JSC «VTI», Moscow,
²ENTEH Engineering AS, Estonia, Kohtla-Järve

LOW NOX BURNERS FOR COMBUSTION OF PROCESSING FUEL GASES

ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ В СИНТЕТИЧЕСКИЕ ЖИДКИЕ ТОПЛИВА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ: СОПОСТАВЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время возобновился интерес к энергетическому использованию растительной биомассы, которая была до начала технической революции основным видом топлива. Это обусловлено влиянием двух основных факторов: ростом цен на ископаемое топливо, который рассматривается рядом стран в качестве угрозы их энергетической безопасности, глобальным изменением климата, что привело к принятию международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов. Для условий России актуальность приобретает применение биомассы в качестве энергетического топлива в отдаленных районах Сибири и Дальнего Востока, где высока стоимость привозного энергетического топлива и, в то же время, значительны запасы древесной биомассы.

Интерес представляют три основных направления использования энергии биомассы: прямое сжигание с получением тепла и электроэнергии; газификация – получение горючих газов, сжигаемых с получением тепла и электроэнергии; и производство синтетических жидких топлив.

В работе рассматривается одно из эффективных направлений переработки биомассы - окислительная конверсия этого сырья с получением газа, обогащенного водородом и оксидами углерода. Предварительно очищенный газ может рассматриваться как синтез-газ для получения ценных синтетических жидких топлив (СЖТ): метанола, диметилового эфира (ДМЭ).

Как окислительная конверсия биомассы, так и возможная переработка синтез-газа в химические продукты связаны с выделением большого количества тепла и оксидов углерода. Совмещение химических процессов с выработкой электроэнергии повышает эффективность переработки техногенных отходов. Анализ технологий переработки различного органического сырья, выполненный в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, выявил целесообразность комбинирования химической технологии переработки с производством электроэнергии. Энергетическая и экономическая эффективность такой комплексной технологии значительно выше, чем отдельных производств.

Целью работы является проведение оптимизационных технико-экономических исследований комбинированного производства электроэнергии

(*) А.С. Медников, mednikov@isem.irk.ru

и метанола или ДМЭ на энерготехнологических установках (ЭТУ) с целью получения оптимальных решений по условиям их вовлечения в ТЭБ отдаленных регионов РФ. Такие исследования проводятся на основе подробных и эффективных в вычислительном плане математических моделей ЭТУ.

На базе математической модели ЭТУ проведены оптимизационные технико-экономические исследования, получены оптимальные термодинамические, расходные параметры, конструктивные характеристики, экономические показатели. Произведено сопоставление ЭТУ синтеза ДМЭ с ранее полученными результатами по ЭТУ синтеза метанола. На рис. 1 показаны зоны эффективности сопоставляемых технологий.

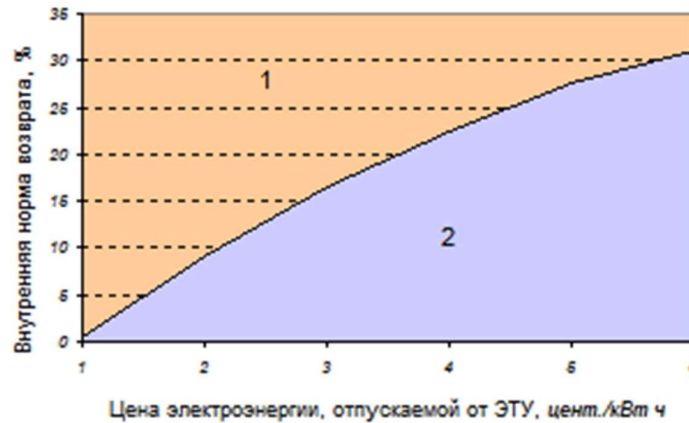


Рис. 1. Зависимость равной экономической эффективности ЭТУ синтеза метанола и ДМЭ, от стоимости отпускаемой электроэнергии: 1 – зона эффективности ЭТУ синтеза ДМЭ, 2 – зона эффективности ЭТУ синтеза метанола.

Сопоставление представленных технологий синтеза СЖТ показало, что ЭТУ синтеза ДМЭ и метанола имеют свои области эффективности, определяемые ценой на отпускаемую ЭТУ электроэнергию, но ввиду более высоких потребительских качеств ДМЭ технология его одностадийного производства из синтез-газа имеет более широкие перспективы.

Исследование выполнено в рамках проекта III.17.1.1 программы фундаментальных исследований СО РАН при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-08-01184_А.

E.A. Tyurina^{1,2}, A.S.Mednikov¹, P.Yu. Elsukov¹, S.N. Sushko²
¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
²Irkutsk national research technical university

THE PROCESSING OF BIOMASS INTO SYNTHETIC LIQUID FUELS AND ELECTRIC ENERGY: COMPARISON OF PERSPECTIVE TECHNOLOGIES

ТЕРМОЛИЗ УГЛЕЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ ТОПЛИВНОГО ГАЗА И ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ

Выполнение задач по увеличению объемов добычи угля на 13% к 2030 г. [1], с реализацией концепции «Чистый уголь – чистый Кузбасс», направленной на снижение негативного воздействия от использования угольного сырья на окружающую среду и человека, возможно только за счёт реализации единого производственного цикла угольной отрасли Кузбасса от добычи до конверсии угля в энергоресурсы и продукты, преимущественно, химические продукты или сырьё для отечественной промышленности. Одним из приоритетных направлений использования низкометаморфизованных углей Кузбасса (которые не пригодны для использования в металлургии и малоэффективны в качестве топлива для энергетики) является их термическая переработка в различных газовых средах, которая в настоящий момент в России находится на стадии НИОКР, с получением жидких, твёрдых, газообразных продуктов, востребованных на рынке. В качестве углей низкой степени метаморфизма рассматриваются сапропелевые угли и бурые угли; запасы которых велики на территории Кузбасса.

Эти виды твердых топлив были использованы для изучения возможности их применения в качестве сырья для термической переработки в восстановительной и нейтральной средах.

Термическая обработка исследуемых углей проводилась в микрореакторах-автоклавах (объемом 20 см³ и 200 см³), в атмосферах СО₂ и Н₂, в диапазоне температур от 400 до 550°С и давлений в интервале от 7,0 до 11,0 МПа; скорость нагрева образцов в реакторе составляла 10-12°С/мин; продолжительность процесса при заданной температуре составляла 20 минут, после чего реактор охлаждали до комнатной температуры. В результате термической обработки исследуемых углей образуются три основных фазы продуктов: 1) газообразные продукты; 2) твердые продукты, содержащие смолу, и 3) небольшие количества (около 3-5% масс.) жидких продуктов, представляющих собой водные растворы органических веществ. Путем последовательной экстракции смолосодержащих твердых продуктов определялись выходы так называемых «угольных жидкостей» (мальтенов и

(*) К.Ю. Ушаков, ushakovkju@kuzstu.ru

асфальтенов), образующихся в ходе термообработки углей. Их экстрагирование проводилось в аппарате Сокслета с использованием химически чистого *n*-гексана (для выделения мальтенов), а затем – аналитически чистого бензола (для разделения асфальтенов и неэкстрагируемых остатков). Предварительно было установлено, что в исходном угле мальтены и асфальтены отсутствовали.

В результате исследований было выявлено, что функциональный состав «угольных жидкостей», образующихся при термообработке барзасского сапромиксита, носит преимущественно парафино-нафтовый характер, что должно в целом оказывать благоприятное воздействие на дальнейшее получение химических продуктов в ходе термической переработки продуктов первичных термопревращений исследуемого угля. После термообработки Барзасского угля разной модификации («рогожка» и плитчатый) без применения катализаторов фиксировалось образование небольшого количества жидкой фазы. По данным хроматографического анализа, основную массу жидкой фазы (выход около 3-5% масс.) продуктов термических превращений сапромиксита («рогожка»), независимо от среды нагрева при 475°C в автоклаве объёмом 20 см³, составляли фенол и его метил- и диметилпроизводные (до 77% масс.). После термообработки Барзасского сапромиксита (плитчатый уголь) при 475°C в среде CO₂ в автоклаве объёмом 200 см³ основу жидкой фазы составляли в основном спирты (преимущественно 1-бутанол) и углеводороды состава C₆-C₁₄. По результатам масс-спектрометрических анализов состава газообразных продуктов, образующихся при термообработке барзасского угля при 475°C определено, что основными углеводородными соединениями, присутствующими в газовой фазе после термообработки сапромиксита, в обеих средах (CO₂ и H₂) являются насыщенные углеводороды состава C₁-C₄; при этом образования газообразных олефиновых углеводородов не наблюдалось. Подобный состав газовой части при дальнейшем сжигании экологически чист. Практическое применение и ценность твёрдого остатка будет определена после анализа его удельной поверхности, предположительно твердый остаток представляет ценность в качестве сорбента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рада А. О. Анализ перспектив конверсии угля в нетопливные продукты в условиях российского рынка / А. О. Рада, Т. В. Тулупова, А. С. Гордиенко – ООО «Сибирская издательская группа», Кемерово 2016. Уч.-изд. л. 9,4.

К.У. Ushakov¹, I.Y. Petrov², A.R. Bogomolov^{1,3}, A.C. Зябрев¹

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,

²Federal Research Center of Coal & Coal Chemistry, SB RAS,

³Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS

THERMOLYSIS OF COALS WITH OBTAINING FUEL GAS AND CHEMICAL PRODUCTS

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ МИКРОВЗРЫВНОМ
ДРОБЛЕНИИ КАПЕЛЬ НЕОДНОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

Введение. Микровзрывное дробление многокомпонентных топлив способствует минимизации расхода топлива, повышению динамики горения, снижению антропогенных выбросов, улучшению процесса распыления топлива [1]. Получение вторичных капель определенных размеров и скоростей позволит достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования, однако необходимые для этого условия остаются малоизученными.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик вторичных капель, образующихся при микровзрывном распаде двухкомпонентных капель.

Методика экспериментальных исследований. Методика проведения исследований аналогична использованной в [2], однако в настоящей работе основное внимание уделено регистрации последствий процессов распада неоднородных капель жидкостей. В экспериментах использовались типичные для топливных технологий жидкости. Характеристики вторичных капель представлены в виде распределений $N(r_d)$, а также в виде отношения площадей до и после распада S_1/S_0 .

Результаты и обсуждения. На рис. 1 представлены распределения вторичных капель, образованных в результате микровзрывного дробления двухкомпонентных капель при нагреве на различных держателях в сравнении со свободно падающей каплей. Максимальное количество образующихся фрагментов соответствует свободнопадающей капле, в данном случае тепловой поток, подводимый к капле, был больше, чем при нагреве на держателях в 4 раза. Распределения на держателях располагаются в последовательности температуропроводности держателей (a для керамического держателя – 0.772 мм²/с; a для никромового держателя – 5.648 мм²/с; a для стального держателя – 9.912 мм²/с), это связано с тем, что держатель является дополнительным источником подвода тепла к капле.

Отношения площадей поверхности капель до и после распада, представленные на рис. 1 не значительно отличается для разных видов держателей, что свидетельствует о том, что материал держателя оказывает слабое влияние на характеристики дробления, поскольку тепловой поток, подводимый к капле от держателя, в несколько раз меньше, чем конвективный тепловой поток.

^(*) Р.М. Федоренко, vfedrm@gmail.com

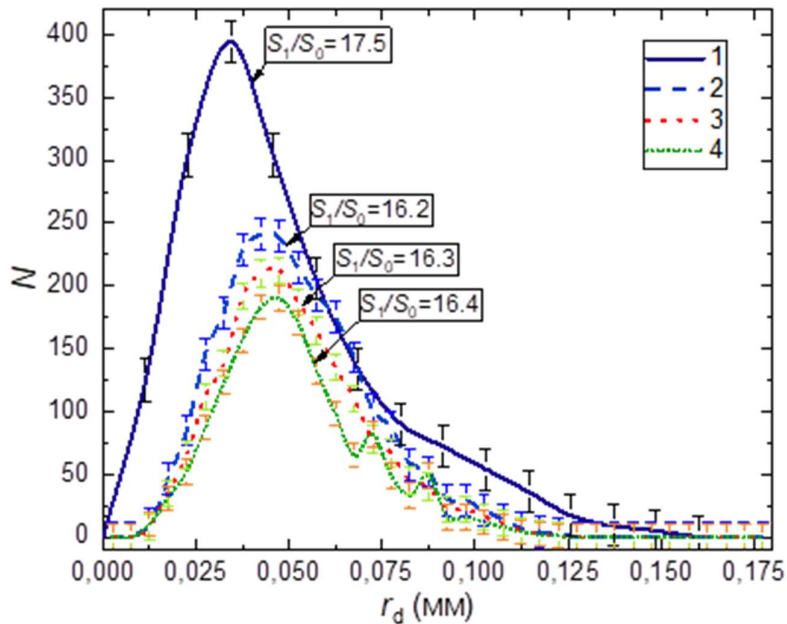


Рис. 1. Распределения размеров вторичных капель ($V_d=2.5$ мкл; 90% Дизель, 10% Вода) для различных материалов держателей: 1 – свободно падающая капля, 950 °С; 2 – стальной держатель, 400 °С; 3 – никромовый держатель, 400 °С; 4 – керамический держатель, 400 °С

Заклучение. По результатам проведенных исследований были установлены типичные распределения вторичных капель, иллюстрирующие влияние группы факторов: температуры, теплового потока, материалов держателей. Создана информационная база данных для развития современных моделей распада неоднородных капель. Полученные результаты важны для развития существующих и создания новых газопарокапельных технологий.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-314.2019.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sazhin S.S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // Fuel, 2017. V. 196. P. 69–101.
2. Volkov R.S., Strizhak P.A. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using Planar Laser-Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry // Exp. Therm. Fluid Sci., 2018. V. 97. P. 392–407.

R.M. Fedorenko, D.V. Antonov, P.A. Strizhak
National research Tomsk Polytechnic University

CHARACTERISTICS OF CHILD-DROPLETS DURING MICRO-EXPLOSION OF TWO-COMPONENT DROPLETS

ПАРАДИГМА ОТКРЫТОГО КОДА ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Климат испытывал колебания на всем протяжении истории человечества. Особенность изменений климата, которые привлекают внимание общества сегодня, заключается в их направленном характере. Современный уровень науки о климате позволяет утверждать, что эти изменения продолжатся, по крайней мере, до конца XXI столетия [1, 2].

Изменения целого ряда климатических параметров самым прямым образом сказываются на работе энергетического оборудования. В условиях современного изменения климата и на фоне постоянного ужесточения требований к энергетической эффективности, понимание этой климатической динамики становится необходимой частью квалификации инженера-энергетика.

Классическая практика учета климатических параметров, основанная на использовании стандартов и справочников, не может обеспечить доступ к актуальным климатическим данным. Получить более полную и детальную картину позволяет анализ метеорологической информации из первоисточников.

Эффективное решение подобных задач анализа данных может быть обеспечено использованием технологий программирования на основе открытого кода. Безусловными преимуществами подобных решений является распределенный характер их разработки, обеспечивающий непрерывное обновление и дополнение доступных расчетных методов, а также возможность непосредственной проверки допущений, заложенных в расчетные пакеты.

В настоящей работе преимущества такого подхода к обработке метеорологических данных было продемонстрировано на примере массива ежедневных температур воздуха, измененных метеостанциями сети Росгидромет [3]. Задачей расчета была оценка наблюдающихся режимов изменения потребности в отоплении с детальностью, необходимой для моделирования работы реальных электростанций. В качестве среды разработки был выбран язык R [4], ставший своего рода стандартом современной науки о данных.

Использованный подход основан на иерархической кластеризации временных рядов суточного разрешения для выбранного сезона (к примеру, зимы, отопительного сезона или всего года). Разработанный программный код позволяет автоматически провести весь процесс проверки и обработки данных для заданного временного периода, рассчитать основные параметры, определяющие потребность в отоплении и кондиционировании и выполнить необходимые визуализации.

^(*) Е.В. Федотова, e.v.kasilova@gmail.com

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-79-10255).

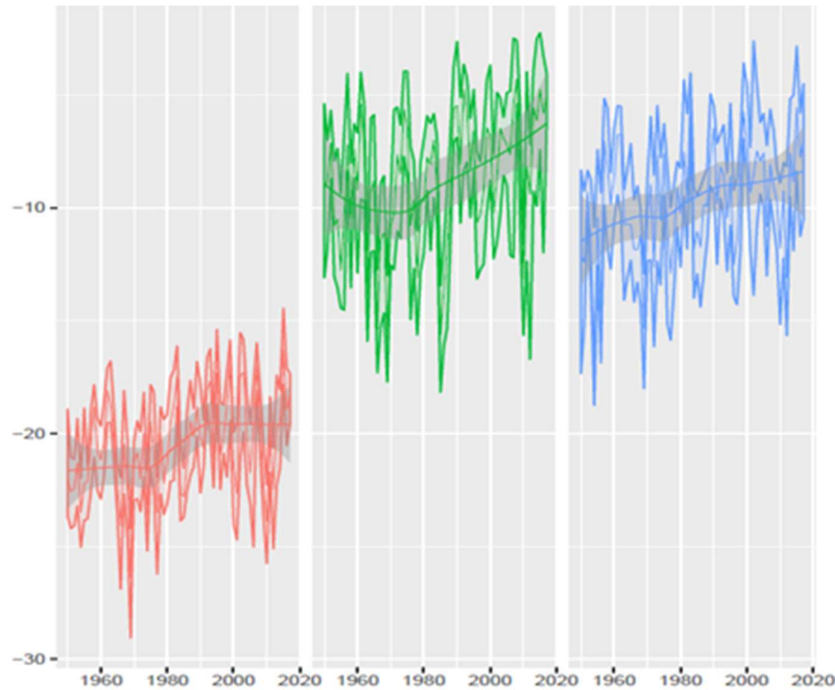


Рис. 1. Ход суточных температур зимой для трех пространственных кластеров, выделенных на территории России. Расчеты автора по данным [3]

ЛИТЕРАТУРА

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker T.F. et al. (eds.) Cambridge: Press, 2013. 1552 p.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Суточная температура воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР)» Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. Дата приоритета 31.03.2014.
4. R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

E.V. Fedotova
Moscow Power Engineering Institute

**OPEN SOURCE PARADIGM: A USE CASE OF THE CLIMATE MODELING
FOR POWER ENGINEERING PROBLEMS**

**РАЗВИТИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ
В КОНТЕКСТЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА: ВОЗМОЖНОСТИ И РИСКИ**

Сегодня мировая энергетика находится в стадии фундаментального перехода в своем развитии. Возобновляемые источники энергии, определившие успех еще первой промышленной революции, в последние годы начинают успешно конкурировать с мощными тепловыми и атомными станциями. Очевидная особенность возобновляемой энергетики состоит в непосредственной зависимости доступной для преобразования энергии от климатических условий.

Современные направленные изменения климата, которые стали особенно заметны со второй половины XX века, с большой долей вероятности продолжатся на протяжении всего XXI столетия [1, 2]. Это означает необходимость учета динамики климатических факторов при средне- и долгосрочном планировании развития энергосистем [3].

Для России наиболее ярким проявлением изменений климата является изменение потребности в отоплении, приводящее к существенной экономии топлива. В недавней работе [4] было показано, что этот эффект на несколько порядков превосходит потери энергии, связанные со снижением эффективности циклов тепловых и атомных электростанций. Что касается изменения условий развития возобновляемой энергетики, этот вопрос для территории России пока исследован меньше [2].

Одна из задач настоящей работы заключалась в проведении предварительных оценок для динамики гидро- и ветроэнергетического потенциала по территории России на протяжении XXI века. Для расчетов была использована классическая методика ансамблевых оценок и данные международного проекта сопоставления сопряженных моделей CMIP5. Особенность нашего подхода заключалась в оценке влияния состава ансамбля на результат, а также в использовании реалистических климатических сценариев [5].

Показано, что условия работы гидроэлектростанций улучшатся на большей части территории страны за счет повышения гидропотенциала и выравнивания внутригодового распределения стока. Что касается ветропотенциала, на Европейской территории и юге Западной Сибири произойдет снижение средней скорости ветра, что согласуется с наблюдаемыми тенденциями [2]. При этом на Дальнем Востоке и в Приморье можно ожидать заметного увеличения средней скорости ветра.

^(*) Е.В. Федотова, e.v.kasilova@gmail.com

Вторым важнейшим фактором, который наряду с климатическими изменениями должен учитываться при планировании развития возобновляемой энергетики, является переменный характер выработки. Эта особенность ветровой и солнечной энергетики означает сложность их использования в существующих энергосистемах и определяет необходимость развития новых технологий управления.

Это направление разработок, известное под маркетинговым названием интеллектуальных сетей (smart grid), развивается в расчетных и лабораторных исследованиях на протяжении последних пятнадцати лет, и на сегодняшний день, по нашим оценкам, находится в стадии перехода к демонстрационным системам, что в ближайшие десятилетия будет иметь ключевое значение для увеличения доли возобновляемой генерации.

Учитывая централизованный характер структуры современных российских энергосистем, а также традиционный для нашей страны состав топливного баланса, можно ожидать, что именно вопрос интеграции возобновляемых источников в существующие энергосистемы станет критическим для входа на рынок ветровой генерации. Представляется, что успешное решение этой проблемы требует совместного учета климатических, инфраструктурных и технологических факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10255). Авторы благодарят исследовательские группы, участвующие в международном проекте CMIP5, за предоставление результатов расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы и Гамбургский международный центр климатических данных за организацию доступа к данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker T.F. et al.. (eds.) Cambridge: Press, 2013. 1552 p.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.
3. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика / Санкт-Петербург, 2016.
4. Klimenko V.V. et al. Vulnerability of the Russian power industry to the climate change / Energy. 142. 2018 P. 1010–1022.
5. Knutti R. // IPCC Working Group I AR5 snapshot: The rcp45 experiment. World Data Center for Climate. 2014. doi:10.1594/WDCC/ETHr4.

E.V. Fedotova, V.V. Klimenko
Moscow Power Engineering Institute

DEVELOPMENT OF THE RENEWABLE POWER GENERATION IN RUSSIA: OPPORTUNITIES AND RISKS

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ПИТАТЕЛЬНЫХ ВОДАХ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ТЭС

Одной из проблем при внедрении парогазовых установок является более жесткие требования к содержанию органических примесей в питательной воде котла-утилизатора, которые выше, чем для блоков с барабанными и прямоточными котлами. Согласно СТО ВТИ (всероссийский теплотехнический институт)— 2009 г в питательной воде котлов — утилизаторов ПГУ общий органический углерод должен ограничиваться значениями 100 мкг/дм^3 , что соответствует международным нормам [1].

Содержание органических примесей в природной воде во много раз превышает содержание неорганических. Они очень разнообразны по своему составу и свойствам. Под действием высоких температур органические примеси могут видоизменяться и превращаться в потенциально опасные для теплового оборудования вещества. Несмотря на тщательную очистку от органических примесей, в пароводяном цикле электростанций может содержаться до 8 мг/дм^3 общего органического углерода [2].

Нужно учесть, что контроль концентрации органических примесей в жидкой и паровой фазах сопряжен с значительными трудностями [3]. Тем более, ранее считалось, что воздействие, оказываемое на систему пароводяного тракта органическими примесями, минимальное или незначительное. В связи с этим, методам их анализа внимание практически не уделялось. В штатной системе химического контроля на электростанциях органические примеси контролируются только на стадии предочистки воды, т.е. на стадии коагуляции и фильтрования. Для анализа питательной воды по органическому компоненту используются анализаторы общего органического углерода, которые в настоящее время являются «золотым стандартом» определения. Однако, на отечественных электростанциях широкое применение данных приборов ограничивается их высокой стоимостью.

Для количественного контроля содержания органических примесей в водах глубокой очистки для питания котлов-утилизаторов был разработан простой, эффективный и недорогой метод. Органические вещества из образцов воды экстрагировали четыреххлористым углеродом (CCl_4) в делительной воронке. Далее остаточный четыреххлористый углерод отгоняли, экстракт высушивали при 25°C . Сухой остаток взвешивали на аналитических весах. Точность измерения составляет $\pm 10\%$.

^(*) А.А. Филимонова, aachichirova@mail.ru

По представленной методике было проведено исследование содержания органических веществ в питательных водах котлов-утилизаторов Казанской ТЭЦ-1 и Казанской ТЭЦ-3. Для контроля эффективности и точности предлагаемой методики образцы экстрагированных органических веществ были подвергнуты дополнительным методам физико-химического анализа – инфракрасной спектроскопии, высокоэффективной жидкостной хроматографии, хроматомасс-спектроскопии, ядерному магнитному резонансу.

По результатам различных методов физико-химического анализа в экстрагированных из питательных вод котлов-утилизаторов образцах был установлен их качественный состав. Обнаруженные органические вещества относились преимущественно к классу гумусовых веществ, которые за счет своих физико-химических свойств способны проникать во все типы глубоко очищенных вод. Остаточного содержания реагента, используемого для экстракции и способного повлиять на результаты определения, в образцах зафиксировано не было.

Таким образом, представленный метод анализа органических примесей в питательных водах котла-утилизатора является точным, несложным в техническом исполнении и независимым от материальной стороны исследования, что в совокупности дает возможность для его применения в качестве альтернативы анализатору общего органического углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 70238424.27.100.013-2009 Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования. М., 2009.
2. Славинская Г.В., Селеменев В.Ф. Органические вещества как фактор, осложняющий кондиционирование воды промышленного и питьевого назначения. Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. № 2. С. 297-302.
3. Белоконова Н.А. Влияние органических примесей на процессы очистки воды в теплоэнергетике: монография / Н.А. Белоконова - Екатеринбург: Ажур, 2008. 104 с.

A.A. Filimonova, N.D. Chichirova, A.A. Chichirov, A.A. Batalova
Kazan State Energy University

TECHNOLOGIES OF MONITORING AND CLEANING OF RETURN MANUFACTURING CONDENSATE IN THE ENERGY-TECHNOLOGICAL COMPLEX OF TPS - PETROCHEMICAL ENTERPRISE

**ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И ОЧИСТКИ
ВОЗВРАТНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНДЕНСАТА
В ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ
ТЭС-НЕФТЕХИМИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ**

Для крупных заводов и промышленных предприятий наиболее эффективной представляется работа в тандеме с тепловыми электрическими станциями с формированием энерготехнологических комплексов ТЭС-промышленное предприятие, связанных, в первую очередь, поставками пара, а также, электроэнергии и горячей воды. В Татарстане к таким комплексам в настоящее время относятся Казанская ТЭЦ-3 – Казаньоргсинтез, Нижнекамская ТЭЦ-1 – Нижнекамскнефтехим. Отработанный пар, который на нефтехимических предприятиях в зависимости от технологии участвует в циклах производства органических компонентов, водной отмывки и охлаждения продукции, химические заводы отдают ТЭС обратно в виде возвратного конденсата. Таким образом, возвратный конденсат с нефтехимических производств характеризуется низким содержанием неорганических веществ и высоким содержанием органических загрязнений в форме дисперсных частиц, эмульсии смол и растворенных углеводов различной степени летучести.

Качества возвратного конденсата должно соответствовать требуемым, указанным в правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, 2003 [1]. При несоответствии параметров возвратного конденсата предлагаем нормам необходимо осуществлять его доочистку физико-химическими способами, либо утилизировать, что сопряжено с материальными затратами и экологическими проблемами [2, 3].

В образцах возвратного конденсата, полученных с заводов по производству бутилкаучука, синтетического каучука, стирола и полиэфирных смол, проводилось определение количественного и качественного состава органических примесей и на основании полученных результатов разрабатывались физические и химические методы очистки.

Образец с завода по производству бутилкаучука был снят с анализа на органические компоненты в связи с определением в нем большого солесодержания, требующего дополнительных способов очистки. В образце с завода по производству синтетического каучука были обнаружены преимущественно бутадиен, бутиловый спирт и соединения с бензольным кольцом. Образец с производства стирола и полиэфирных смол содержал

^(*) А.А. Филимонова, aachichirova@mail.ru

этиленгликоль, вещество с ароматическим кольцом, терефталевую кислоту и фталевый ангидрид.

В связи с летучестью обнаруженных органических веществ в образцах положительный эффект был достигнут при очистке методами отстаивания, кипячения и флотации. Пропускание образцов через угольный фильтр или добавление коагулянта также эффективно удаляли органические вещества, но требовали дополнительной обработки в связи с попаданием в образцы частиц угля или ионов железа.

На основании полученных результатов можно рекомендовать проведение процедуры флотации пузырьками воздуха малого диаметра в течение 60 минут образцов возвратного конденсата, поступающего на ТЭС, после использования на заводах по производству синтетического каучука и стирола и полиэфирных смол в качестве приоритетного метода очистки от органических примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – СПб.: ДЕАН, 2004. 336 с.
2. Шарифуллин В.Н., Файзрахманов Н.Н., Шарифуллин А.В. Способ очистки конденсата пара разбавления процесса пиролиза. Патент на изобретение RUS 2185340 04.05.2001
3. Нор П.Е., Бучель Н.И., Садыбекова Н.К. Очистка возвратного конденсата от мехпримесей и нефтепродуктов. В сборнике: актуальные вопросы энергетики материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 344-347.

A.A. Filimonova, N.D. Chichirova, A.A. Chichirov, A.G. Filimonov
Kazan State Energy University

TECHNOLOGIES OF MONITORING AND CLEANING OF RETURN MANUFACTURING CONDENSATE IN THE ENERGY-TECHNOLOGICAL COMPLEX OF TPS - PETROCHEMICAL ENTERPRISE

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИСТЕННОЙ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ, ВДУВАЕМОЙ ЧЕРЕЗ НАКЛОННЫЕ КРУГЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ПОПЕРЕЧНУЮ ТРАНШЕЮ

Непрерывное улучшение рабочих характеристик газотурбинного двигателя требует постоянного повышения температуры на входе в турбину. Температура газа в современных газовых турбинах выше, чем рабочие температур материалов, используемых для изготовления лопаток турбины. Поэтому их охлаждение является одной из важнейших проблем в турбостроении технологии. Среди большого числа методов охлаждения широкое распространение получили гидродинамические способы защиты, когда охлаждающий газ вдувается в пограничный слой через защищаемую поверхность. При таком способе охладитель в виде пристенной завесы защищает лопатки турбины от воздействия потока горячего газа. Существует несколько способов подачи охладителя для защиты рабочих поверхностей через наклонные круглые отверстия, специальные профилированные отверстия и т.д. Одним из самых технологически простых способов является подача охладителя через круглые наклонные отверстия, расположенные в поперечной траншее. В последнее десятилетие выполнено около десятка экспериментальных и численных работ по данной тематике [1-4].

В текущей работе представлены данные экспериментального исследования структуры течения пристенной газовой завесы, вдуваемой через наклонные круглые отверстия в поперечную траншею методом LDA. Исследования проводились для однорядовой системы из трех отверстий с расстоянием между их осями $3.3b$. Отверстия были расположены под углом $\alpha = 30^\circ$, без и в траншее глубиной $h = 2$ мм и шириной $w = 6.4$ мм ($h/w = 0.375$) и при величине параметра вдува $BR = 1$.

Противовращающиеся вихревые пары, обычно связанный со струей в поперечном потоке, отсутствуют, что качественно подобно выводам работы [5]. Для вдува газа в траншею вытекающие из поперечной траншеи струи ведут себя как своего рода преграда на пути основного потока, и они образуют большую вихревую зону, занимающую до половины ширины канала, которая разрушает систему вихрей, образованных пристенными струями. Пик ширины вихря находится на расстоянии примерно $X = 3$ мм ($X/b = 1$). Струя имеет максимум осевой скорости на расстоянии 3 мм от выхода, равный 9 м/с ($X = 5$ мм), а основной поток от 0 до 3 мм разворачивает струи параллельно себе. Эффект

(*) М.В. Филиппов, mfilippov181096@gmail.com

деформации сохраняется при 40 мм и длина зоны смешения значительно больше и равномернее (рис.1). Это связано с тем, что образуется два параллельных слаботурбулентных течения, которые слабо смешиваются друг с другом. Это позволяет говорить об аэродинамической эффективности завесы на достаточно большие расстояния, как показано в работе [5]. В целом, можно сказать, что имеется качественное согласие между нашими измеренными профилями продольной скорости газа и данными экспериментов других авторов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00386).

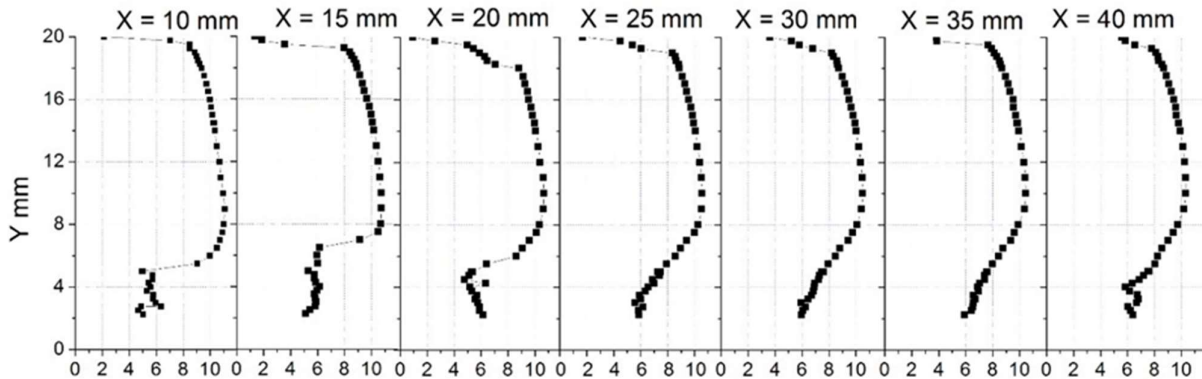


Рис. 1. Профили продольной V_x компоненты скорости по длине канала. (основной поток, наклонный вдув в траншею глубиной $h = 2$ мм). ($X = 10 - 40$ мм)

ЛИТЕРАТУРА

1. Waye S.K. and Bogard D.G., High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations, *Trans. ASME, J. Turbomachinery*, 2007, Vol. 129, P. 294–302.
2. Khalatov A.A., Borisov I.I., Dashevskii Yu.Ya., Kovalenko A.S., and Shevtsov S.V., Film cooling of a flat surface by a single-row system of inclined holes embedded in a trench: Effects due to free-stream turbulence and flow acceleration, *Thermophys. and Aeromech.*, 2013, Vol. 20, No. 6, P. 731–737.
3. Lee K.D. and Kim K.Y., Film cooling performance of cylindrical holes embedded in a transverse trench, *Num. Heat Transfer, Part A*, 2014, Vol. 65, P. 127–143.
4. Pakhomov M.A., Terekhov V.I., Khalatov A.A., and Borisov I.I. Film cooling effectiveness with injection through circular holes embedded in a transverse trench, *Thermophys. and Aeromech.*, 2015, V. 22, No. 3. P. 329-338.
5. Coletti F., Elkins C.J., Eaton J.K. An inclined jet in crossflow under the effect of streamwise

M.V. Philippov¹, I.A. Chokhar², M.A. Pakhomov²

¹Novosibirsk State University,

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk

FEATURES OF EVOLUTION OF THE FLOW IN THE NEAR FIELD OF THE RING JET

¹Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет,²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕЧЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУИ

Исследования течения турбулентных кольцевых струй представляют большой интерес, как с практической, так и с фундаментальной точек зрения. Несмотря на довольно простую геометрию, поле течения кардинальным образом зависит от ряда параметров, которые, как следствие, определяют интенсивность перемешивания, дальнобойность струи и эжекцию окружающего газа.

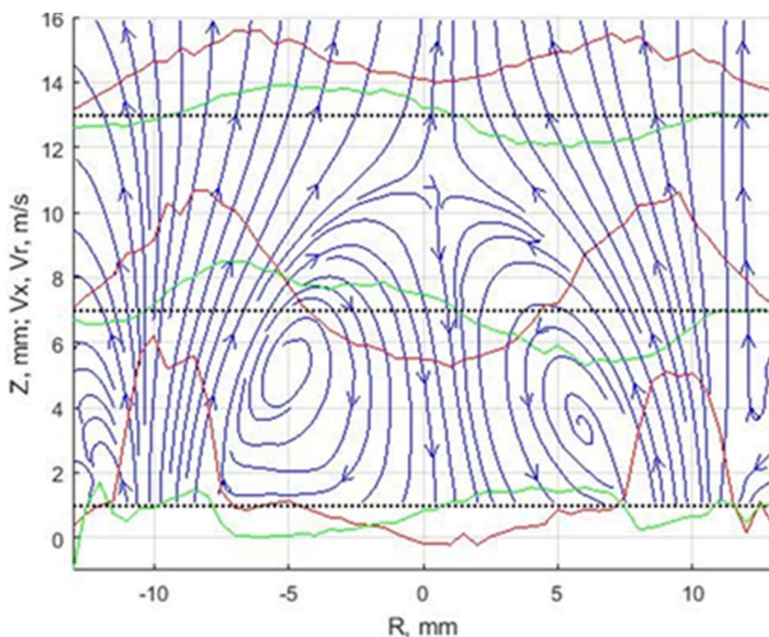


Рис. 1. Линии тока (синие), профили осевой (красные) и радиальной (зеленые) компонент скорости. $Re = 5500$

Экспериментальное и теоретическое исследование закрученных струй проводится достаточно давно [1,2] и интенсивно. Особенно большое развитие эти работы получили применительно к импактным закрученным струям [3], в том числе и при их натекании на поверхности сложной формы [4]. Эти задачи являются важными с точки зрения решения проблем интенсификации теплообмена [5]. При этом наименее изученным является течение вблизи сопла

(*) М.В. Филиппов, mfilippov181096@gmail.com

и на начальном участке струи, где возможно существование обратных потоков, крупномасштабных ячеистых структур и явления гистерезиса [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования структуры осредненного течения и турбулентности в ближней зоне кольцевой закрученной струи. С помощью двухкомпонентного лазерно-доплеровского анемометра для кольцевых струй с углом закрутки $0 - 60^{\circ}$ и соотношением диаметров $d_1/d_2 = 0.73$ получены данные о распределении средних и пульсационных составляющих скорости. Представлены результаты по всем трем компонентам: осевой, радиальной и тангенциальной скорости в ближней области струи (до 5 диаметров внешнего кольца).

В результате проведенного анализа показано, что важную роль в динамике потока и процессе смещения кольцевой струи играет образование внутреннего тороидального вихря вблизи сопла (рис. 1). Также отмечается появление стационарного тороидального вихря снаружи кольца. Эти структуры определяют течение в ближней зоне струи. При исследованных числах Рейнольдса такой характер течения в ближней зоне приводит к росту скорости перемешивания, высокой степени турбулентности и увеличению эжекционной способности струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00986).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахмедов Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К. и др. Аэродинамика закрученной струи. М.: Энергия, 1977. 240 с.
2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
3. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 2007, V. 28. P. 1340.
4. Terekhov V.I., Mshvidobadze Y.M. Features of heat transfer at interaction of an impinging swirl jet with a dimple // *Therm. Sci. Int. Sci. J.*, 2016. V. 20 (Suppl. 1). P. 35–45.
5. Терехов В.И., Калинина С.В., Шаров К.А. Конвективный теплообмен при натекании кольцевой струи на плоскую преграду // *ТВТ*, 2018. Т. 56, № 2, С. 229–234.
6. Trávníček Z., Werner E., Maršík E., Kordík J., Šimurda D. Swirling annular impinging jets with hysteretic behavior // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 6. Proc. 6-th Int. Symp. Turbulence, Heat and Mass Transfer, Rome, 2009.* 12 P.

M.V. Philippov¹, I.A. Chokhar², V.V. Terekhov², V.I. Terekhov²

¹Novosibirsk State University,

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk

FLOW EVOLUTION IN THE NEAR FIELD OF A TURBULENT ANNULAR JET

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ: РАСЧЕТЫ
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ**

Моделирование диффузии в газах и жидкостях методами прямого численного моделирования имеет как теоретический, так и практический интерес. С одной стороны, это дает возможность проверить теории и гипотезы, которые используются в физике жидкостей и газов. С другой, позволяет получить новую информацию о механизмах диффузии в таких системах.

Механизмы молекулярной диффузии в газах и жидкостях сильно различаются. Диффузия в разреженных газах характеризуется свободным движением молекул между столкновениями с другими молекулами. Релаксация скорости молекул происходит в результате парных столкновений. Такой механизм диффузии можно назвать «столкновительным». Он характеризуется примерно корневой зависимостью коэффициентов диффузии от температуры.

Диффузия в жидкостях проходит иначе. Принято считать, что молекулы жидкости совершают колебательные движения около своего локального положения равновесия и лишь изредка совершают прыжки в новое положение равновесия. Такой механизм диффузии можно назвать «прыжковым». Он приводит к «аррениусовской» зависимости коэффициентов диффузии от температуры.

Метод молекулярной динамики позволяет различить эти два механизма по температурной зависимости рассчитанных коэффициентов диффузии при различной плотности молекулярной системы. В работе рассчитывались коэффициенты самодиффузии в однокомпонентной и диффузии в бинарной молекулярной системе леннард-джонсовских частиц. В ячейке содержалось от 1000 до 10000 частиц. Сначала вычислялись зависимости автокорреляционных функций скорости частиц от времени. Затем вычислялись их коэффициенты диффузии по формуле Грина – Кубо. Расчеты проведены в широком диапазоне плотностей и температур системы. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными.

Ранее в наших работах [1, 2] была обнаружена универсальная зависимость приведенного коэффициента диффузии (по отношению к коэффициенту диффузии Больцмана – Чепмена – Энскога) от плотности в однородных системах малой и средней плотности. Это выражалось в независимости приведенного коэффициента от температуры системы. Очевидно, что это обусловлено одним и тем же механизмом релаксации скорости молекул в таких системах, связанным

^(*) Г.В. Харламов, g_kharlamov@ngs.ru

с парными столкновениями молекул друг с другом. Отклонения от этой зависимости наблюдаются в области образования второй фазы – капелек жидкости в паре или пузырьков пара в жидкости. В работах [3, 4] показано, что зависимость коэффициента диффузии в плотных системах (в жидкостях) от температуры является линейной (см. Рис. 1), что связано с проявлением другого коллективного механизма диффузии, отличного как от «столкновительного», так и от «прыжкового».

В настоящей работе обсуждаются различные модели диффузии в жидкостях, которые могут привести к линейной температурной зависимости коэффициентов диффузии.

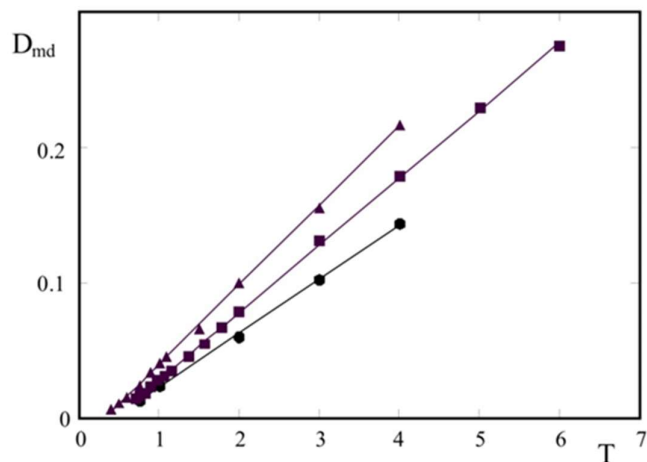


Рис. 1. Зависимости коэффициентов самодиффузии, рассчитанных методом молекулярной динамики, от температуры для различной плотности леннард-джонсовской жидкости: ● – $\rho = 0.782$; ■ – $\rho = 0.845$; ▲ – $\rho = 0.888$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилкин С.В., Харламов Г.В. Исследование диффузии леннард-джонсовских частиц в условиях фазового перехода методом молекулярной динамики // Оптика атмосферы и океана, 2015. Т. 28. № 2. С. 138-142.
2. Kharlamov G. V. and Zhilkin S. V. Molecular Dynamics Simulation of the Molecular Diffusion in Gases and Liquids // Engineering Letters, 2017. V. 25. N 2. P. 222-227.
3. Kharlamov G. V. and Zhilkin S. V. The molecular dynamics simulation of self-diffusion in gases and liquids // Journal of Physics: Conference Series, 2017. V. 899. 052009.
4. Kharlamov G. V. About diffusion mechanisms in gases and liquids from data of molecular dynamics simulation // Journal of Physics: Conference Series, 2018. V. 1105. 0121522018.

G.V. Kharlamov
Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences

THE MOLECULAR DIFFUSION IN GASES AND LIQUIDS: MOLECULAR DYNAMICS CALCULATIONS

В.В. Хасхачих^{1, (*)}, Г.Я. Герасимов², В.Ф. Корнильева³¹Объединенный институт высоких температур РАН,²Научно исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова,³Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Производственная деятельность нефтеперерабатывающих и нефтегазодобывающих предприятий неизбежно оказывает техногенное воздействие на объекты окружающей среды, а одним из наиболее опасных загрязнителей являются нефтесодержащие отходы. Данные отходы представляют собой сложные физико-химические смеси, которые состоят из нефтепродуктов, механических примесей и воды [1]. Их образование происходит при таких технологических процессах как: сбросы при подготовке нефти, зачистка нефтяных резервуаров, сбросы нефтесодержащих отходов буровых работ, сбросы при испытаниях или ремонте скважин, аварийные разливы при транспортировке нефти. В зависимости от происхождения НСО существенно отличаются по своему составу и физико-химическим свойствам [2]. В России на одну тонну добываемой нефти приходится до 7 кг нефтешламов [3]. Угрожающий рост ежегодно накапливаемых опасных нефтесодержащих отходов при отсутствии необходимых масштабов их утилизации и переработки приводит к изъятию земельных ресурсов на длительные сроки.

Реализуемые на большинстве предприятий методы утилизации не позволяют перерабатывать НСО без образования вторичных отходов. В связи с этим их утилизация является одной из приоритетных задач нефтеперерабатывающих предприятий в деятельности, направленной на повышения эффективности использования углеводородного сырья и снижение негативного воздействия на окружающую среду. На данный момент при утилизации нефтесодержащих отходов отдается предпочтение термическим методам, позволяющим наиболее полно использовать энергетический потенциал данных отходов. Из существующих термических методов для утилизации НСО, как правило, применяют сжигание или пиролиз.

Сжигание представляет собой процесс окисления органической части отходов при температуре 800 - 1000 °С в присутствии кислорода. В составе НСО содержатся соединения тяжелых металлов, часть которых (ртуть, кадмий и мышьяк) даже при самых совершенных технологиях низкотемпературного (700 - 800 °С) сжигания переходит в летучее состояние и приводит к необходимости использования дорогостоящей системы очистки дымовых газов. Помимо этого

(*) В.В. Хасхачих, v.khaskhachikh@gmail.com

фактора, сжигание НСО сопровождается выделением токсичных пылегазовых выбросов, содержащих оксиды серы и азота, а также бензапирены и хлорсодержащие соединения, которые могут образовывать полихлорированные дибензо-*p*-диоксины (ПХДД) и дибензофураны (ПХДФ) - группы опасных химических веществ, известных как стойкие органические загрязнители.

Термическое разложение (пиролиз) представляет собой деструкцию органических соединений под действием высоких температур без доступа кислорода. В процессе пиролиза образуются жидкие, твердые и газообразные продукты. Данный способ позволяет наиболее полно осуществить конверсию углеводородов из НСО, с целью их возврата в производственный цикл, а также контролировать выбросы тяжелых металлов.

В ранее проведенной работе исследовали принципиальную возможность получения жидких продуктов из нефтешламов [4]. Целью данной работы является определение режимных параметров процесса пиролиза для извлечения жидких продуктов из различных видов НСО.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00282).

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheng S., Chang F., Zhang F., Huang T., Yoshikawa K., Zhang H., 2018, Progress in thermal analysis studies on the pyrolysis process of oil sludge // *Thermochimica Acta*, 663, 125-136.
2. Онорин С.А., Баталин Б.С., Калинин Н.Ф., Ходяшев М.Б. Исследование физико-химических свойств и определение путей ликвидации твердых остатков после термообработки нефтесодержащих отходов ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 2010. № 6., с. 45-49.
3. Тимошин А.Ф., Николаев А.П., Нитяговский А.М., Ложкина Д.А. Анализ способов утилизации нефтесодержащих отходов и разработка нового комплексного способа утилизации нефтешламов резервуарного типа // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2016. № 6-2., с. 209-213.
4. Kaminsky W., Schmidt H. Pyrolysis of oil sludge in a fluidized bed reactor // *Chemosphere*, 2001. 45, с. 285 – 290.

V.V. Khaskhachikh¹, G.Ya. Gerasimov², V.F. Kornilieva³

¹Joint Institute for High Temperatures,

²M.V. Lomonosov Moscow State University; Institute of Mechanics,

³G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute

STUDY OF PYROLYSIS PROCESS OF DIFFERENT TYPES OF OIL-CONTAINING WASTES

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА
ЧЕРЕЗ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСЫ**

Явление теплового контактного сопротивления было обнаружено Капицей в экспериментах между жидким гелием и медью [1]. Когда тепловой поток проходит через интерфейс между двумя объектами, создается тепловое контактное сопротивление $R_B = \Delta T / \Delta q$, где Δq – суммарный тепловой поток. Первая теория этого явления между жидким гелием и твердым телом была разработана Халатниковым [2].

В данной работе представлен метод расчёта теплового контактного сопротивления в рамках модели АММ. Главной проблемой при решении этой задачи является определение коэффициентов переноса энергии от одного тела к другому. Её решение требует анализа отражения и преломления акустических волн на поверхности контакта тел [3]. Важной особенностью обсуждаемой здесь модели является обязательный учёт всех типов волн, распространяющихся в твёрдых телах, и результаты численного расчета амплитуды разных отраженных и преломленных волн должны удовлетворять закону сохранения энергии.

Сформулируем последовательность расчета теплового контактного сопротивления на интерфейсе между двумя различными телами.

1. Расчет зависимостей амплитуд отраженных и преломленных волн от угла падения исходных продольных и поперечных волн.
2. Баланс энергии отраженных и преломленных волн.
3. Определение коэффициентов прохождения энергии через интерфейс $\Pi_{i,j}(\theta_0)$, где θ_0 – угол падения.
4. Определение теплового контактного сопротивления.

Особенность существующих работ заключается в том, что учитывается перенос только продольными волнами (поперечными не учитывается). Также не рассматривается ряд других факторов (например, критические углы преломления падающих волн, и пр.)

В данной работе впервые получены тепловые контактные сопротивления при падении тепловых потоков, направленных со стороны обоих тел $q_{1 \rightarrow 2}$ и $q_{2 \rightarrow 1}$. При расчете тепловых контактных сопротивлений суммарный тепловой поток определяется разницей тепловых потоков $q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1}$, либо $q_{2 \rightarrow 1} - q_{1 \rightarrow 2}$.

В результате математического моделирования получаем тепловое контактное сопротивление при разных поляризациях и с двух направлений.

^(*) В.И. Хвесьюк, khvesyuk@bmstu.ru

$$R_{B,i,j} = \frac{30\hbar^3 T^{-3} c_j^2}{\pi^2 k_B^4 \Gamma_{i,j}},$$

где, $i - 1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$, j – падающая поперечная волна (TA) и продольная волна (LA), \hbar – постоянная Планка, c_j – соответствующая скорость, k_B – постоянная Больцмана, $\Gamma_{i,j} = 2 \int_0^{\pi/2} \Pi_{i,j} \cos\theta_0 \sin\theta_0 d\theta_0$.

И суммарное тепловое контактное сопротивление $R_{B,i}^{-1} = \sum_j R_{B,i,j}^{-1}$.

На рис. 1 видно, что результаты теоретических расчетов теплового контактного сопротивления интерфейса между сапфиром и свинцом находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [4] на гладкой поверхности.

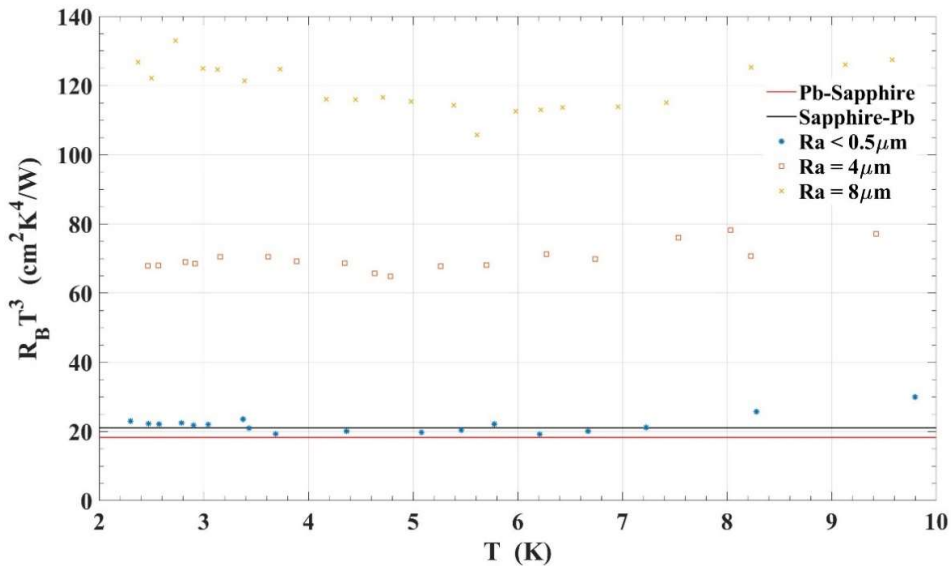


Рис. 1 Тепловое контактное сопротивление R_B для интерфейса между сапфиром и свинцом, умноженные на T^3 , как функция температуры T с двух разных направлений Pb-Sapphire и Sapphire-Pb. R_a – среднеквадратичная шероховатость [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kapitza P.L. Heat transfer and superfluidity of He-II // J. Phys. (USSR), 1941. V. 4. P. 181.
2. Халатников И.М. Введение в теорию сверхтекучести. М.: Наука, 1952. 128 с.
3. Achenbach J.D. Wave Propagation in Elastic Solids. N.Y.: Elsevier Pub. Co., 1973. 425 p.
4. Sahling S., Engert J., Gladun A. et al. The thermal boundary resistance between sapphire and Al monocrystals at low temperature // J. Low Temp. Phys., 1981. V. 45. P. 457-469.

V.I. Khvesyuk, B. Liu, A.A. Barinov
Bauman Moscow State Technical University

MODELING OF HEAT PROPAGATION THROUGH THERMAL INTERFACES

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОГО МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИФФУЗИИ ФОНОНОВ

Процессы переноса тепла в диэлектриках и полупроводниках определяются кинетикой газа безмассовых квазичастиц – фононов. В этом заключается его аналогия с кинетикой классических газов. Однако, характер взаимодействий фононов значительно сложнее взаимодействий атомов и молекул. Детальный анализ кинетических процессов в фононном газе – сложная задача. Это связано с большим количеством факторов, от которых зависят взаимодействия фононов друг с другом [1]. В связи с этим, как правило, используются упрощенные кинетические модели [2] для расчёта теплофизических свойств твёрдых тел.

В данной работе авторами сформулирована модель, наиболее полно учитывающая особенности взаимодействия фононов друг с другом и основанная на применении прямого Монте-Карло моделирования диффузии фононов. При этом учитывались следующие факторы:

- 1) Тройные взаимодействия распада и слияния фононов.
- 2) Учтены нормальные процессы взаимодействия и процессы с перебросом.
- 3) Процессы взаимодействия поперечных, TA , и продольных, LA , акустических фононов.
- 4) Средние времена между последовательными взаимодействиями фононов, рассчитанные *ab initio* [3].
- 5) Реальные дисперсионные соотношения, полученные из эксперимента [4].
- 6) Принимается допущение, что газ находится в состоянии, близком к состоянию равновесия (функция распределения Бозе – Эйнштейна).
- 7) Развита методика расчёта диффузии фононов в $2D$ и $3D$ приближении.

В известных работах, в которых используется метод Монте-Карло для расчёта теплопроводности [5,6] вынужденно используются серьёзные упрощения. В статьях [7,8] рассматривались процессы самодиффузии фононов, при этом не учитывались температурные зависимости, в [7] использована сильно упрощённая модель, в [8] описание модели отсутствует.

На основе представленной модели разработан программный комплекс, который позволил провести математическое моделирование диффузии фононов и получить следующие результаты. 1) Оценка коэффициентов переноса (диффузии и теплопроводности). 2) Зависимости коэффициентов диффузии от температуры. 3) Зависимости квадратов расстояний между начальной точкой отсчёта и точкой нахождения квазичастицы в рассматриваемый момент времени.

^(*) В.И. Хвесюк, khvesyuk@bmstu.ru

4) Доли нормальных процессов и процессов с перебросом для разных температур. 5) Доли различных процессов взаимодействия акустических фононов в зависимости от температуры и энергии фононов.

Большой интерес представляют впервые полученные зависимости от температуры долей нормальных процессов и процессов с перебросом. В частности, показано, что доля процессов с перебросом не может превышать примерно 0,6 от общего количества процессов даже при высоких температурах (в работе [7] принято, что эти процессы составляют 100%). Получен ряд других данных, представляющих практический интерес.

Наконец, важным результатом является факт разработки соответствующего метода расчёта кинетики фононного газа. Метод может быть применён при решении задач, связанных с процессами переноса тепла в наноструктурах, в условиях очень больших скоростей нарастания тепловых потоков (до фемтосекундных продолжительностей импульсов).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, проект 16.8107.2017 / 6.7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диффузия фононов / В.И. Хвесьюк, В. Цяо, А.А. Баринов // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах (22—26 октября 2018 г., Москва). Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 293-296.
2. Khvesyuk V.I., Barinov A.A. Hierarchy of models for calculating the thermal conductivity in nanostructures // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017. V. 891. P. 012352.
3. Ward A., Broido D.A. Intrinsic phonon relaxation times from first-principles studies of the thermal conductivities of Si and Ge // *Phys. Rev. B*, 2010. V. 81. P. 085205.
4. Nilsson G., Nelin G. Study of the Homology between Silicon and Germanium by Thermal-Neutron Spectrometry // *Phys. Rev. B*, 1972. V. 6. P. 3777-3786.
5. Mazumder S., Majumdar A. Monte Carlo Study of Phonon Transport in Solid Thin Films Including Dispersion and Polarization // *J. Heat Transfer*, 2001. V. 123. P. 749-759.
6. Lacroix D., Joulain K., Lemonnier D. Monte Carlo transient phonon transport in silicon and germanium at nanoscales // *Phys. Rev. B*, 2005. V. 72. P. 064305.
7. Kukita K., Kamakura K. Monte Carlo simulation of phonon transport in silicon including a realistic dispersion relation // *J. Appl. Phys.*, 2013. V. 114. P. 154312.
8. Vermeersch B. et al. Superdiffusive heat conduction in semi-conductor alloys. I. Theoretical foundations / B. Vermeersch, J. Carrete, N. Mingo, A. Shakouri // *Phys. Rev. B*, 2015. V. 91. P. 085202.

V.I. Khvesyuk, W. Qiao, A.A. Barinov
Bauman Moscow State Technical University

THE APPLICATION OF DIRECT MONTE CARLO SIMULATION FOR SOLVING THE PROBLEM OF PHONON DIFFUSION

ПРЕПОДАВАНИЕ КУРСА «ТЕПЛОФИЗИКА НАНОСТРУКТУР»

Курс лекций «Теплофизика наноструктур» в МГТУ им. Н.Э. Баумана читается кафедрой «Теплофизика» для нескольких кафедр.

Теплофизика наноструктур изучает перенос тепла в твёрдых телах, размеры которых порядка, меньше или значительно меньше, чем средние длины пробега переносчиков тепла. Важнейшим следствием этого является неприменимость закона Фурье в качестве основы для изучения распространения тела в наноструктурах. В этом смысле теплофизика наноструктур – совершенно новое направление в теплофизике. Новизна заключается в том, что классическая теплофизика твёрдых тел – феноменологическая теория, основанная на законе Фурье. Теплофизика наноструктур – область, в которой закон Фурье неприменим, так как перенос тепла в этих условиях недиффузионный. Здесь используются статистические методы анализа переноса тепла в твёрдых телах.

Второй важнейшей особенностью теплофизики наноструктур является то, что перенос тепла в диэлектриках и полупроводниках осуществляется фононами – квазичастицами нулевой массы. Свойства фононного газа определяются из анализа динамических свойств решёток твёрдых тел. В результате вводится понятие эффективной теплопроводности наноструктур. Которая зависит, как от свойств материала и температуры, так и от размеров, формы структуры, направления теплового потока. Также существенную роль в переносе тепла в сложных наноструктурах, состоящих из большого числа элементов, играют сопротивления Капицы. Особенное направление в рамках теплофизики наноструктур – теплофизические свойства графена, углеродных нанотрубок и графеновых лент.

Таким образом, изучение теплофизики наноструктур связано с необходимостью разработки новых физических моделей и новых математических средств.

Необходимо указать, что теплофизика наноструктур – важное фундаментальное направление в развитии нанотехнологий. Дело в том, что переход к наноразмерам приводит к уменьшению теплопроводности структур и росту тепловыделения, если речь идёт об электронных устройствах. В результате существенно усложняется проблема поддержания теплового режима установок. И в этом смысле теплофизика играет ключевую роль в развитии будущих нанотехнологий.

Далее кратко представлен план курса «Теплофизика наноструктур».

(*) В.И. Хвесьюк, khvesyuk@bmstu.ru

Введение содержит определение данной дисциплины и изложение проблем, связанных с определением условий, обеспечивающих рабочие тепловые режимы различных наноструктур.

Раздел «Термодинамика твёрдых тел» содержит методы и результаты определения термодинамических свойств макроскопических и наноразмерных твёрдых тел.

Раздел «Перенос тепла в твёрдых телах» содержит следующие подразделы, касающиеся теплопроводности как макроскопических, так и наноразмерных твёрдых тел. Во-первых, «Динамика решётки твёрдых тел». Представлены закономерности распространения классических волн внутри твёрдых тел. Сформулирован переход к квантово-механическому представлению о фононах – переносчиках тепла в твёрдых телах. Определены особенности взаимодействия фононов друг с другом и с несовершенствами решётки. Подраздел «Кинетика переноса тепла в твёрдых телах». Представлены методы определения теплопроводности твёрдых тел на основе решения транспортного уравнения Больцмана с использованием результатов предыдущего подраздела. Подраздел «Перенос тепла через контактные сопротивления». Практическая важность этого подраздела сопоставима с предыдущим с точки зрения наноструктур. Представлена физика микроскопического переноса тепла через тепловые контакты соседних элементов, и методы расчёта сопротивлений Капицы. Последние два подраздела сопровождаются обширным материалом, состоящим из теоретических и экспериментальных результатов.

Раздел «Свойства наноматериалов» представляет справочные сведения о теплофизических и некоторых других свойствах наноструктур. К ним относятся материалы из графита, полупроводниковые материалы, нанокompозитные материалы, керамики и др. Большое внимание уделяется изложению теплофизических свойств и методов расчёта графена и графеновых нанолент, так как их практическое значение в будущих нанотехнологиях представляется очень важным.

Раздел «Методы расчёта наноустройств» включает в себя результаты расчётов транзисторов, термоэлектрических преобразователей, солнечных батарей, и др. В последнем разделе представлены методы разработки новых материалов, свойства которых удовлетворяют поставленным требованиям. Речь идёт о методах воздействия на микроскопическом уровне, о построении специальных решёток твёрдых тел.

V.I. Khvesyuk¹, Yu.M. Yanushkin^{1,2}

¹Bauman Moscow State Technical University,

²National University of Science and Technology «MISiS»

DISCIPLINE «THERMAL PHYSICS OF NANOSTRUCTURES»

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ УГЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ
ПРИ ПЫЛЕУГОЛЬНОМ СЖИГАНИИ**

При сжигании низкосортных углей существенно ухудшается их воспламенение и выгорание, значительно возрастают вредные пылегазовые выбросы. Одним из возможных вариантов решения проблемы является предварительная высокоэнергетическая подготовка твердого топлива, которая может быть осуществлена при помощи «механоактивации» угольного топлива в энергонапряженной мельнице – дезинтеграторе [1]. Данный способ обработки значительно повышает реакционную способность угольной пыли. При данном воздействии на угольное вещество происходит значительное преобразование минеральной части топлива, изменение характеристик газового и золowego потока у поверхности нагрева, что может привести как к снижению, так и увеличению загрязнения поверхности нагрева котельного агрегата [2]. Установление закономерностей процесса образования отложений при пылеугольном сжигании угля, прошедшего предварительную интенсивную механическую обработку в мельницах с высокоэнергетическим воздействием, является до сих пор не решенной научной задачей и требует дополнительных лабораторных исследований.

В данной работе представлены результаты экспериментальных и расчетных работ по влиянию измельчения углей в разных по степени энергонапряженности мельницах на процессы преобразования минеральной части углей и образования шлаковых отложений при пылеугольном сжигании на огневом стенде. Были рассмотрены угли разной степени метаморфизма: кузнецкий каменный уголь, бурый уголь Канско-Ачинского бассейна и каменный уголь Экибастузского бассейна. Рассматривалось два типа мельниц: энергонапряженная мельница – дезинтегратор и стандартная шаробарабанная мельница (ШБМ).

Для определения состава продуктов термического преобразования минеральных веществ после измельчения на разных мельницах, а также их распределения по размерным фракциям, был использован метод рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. Результаты экспериментов показали, что при измельчении в дезинтеграторе Кузнецкого и бурого угля, по сравнению с ШБМ, наблюдается обогащение мелкой фракции компонентами внутренней золы (кальцийсодержащие минералы) и железосодержащими минералами. Результаты лабораторных исследований проб Экибастузского угля

^(*) М.Ю. Чернецкий, micch@yandex.ru

после измельчения в дезинтеграторе и шаробарабанной мельнице показали незначительное влияние способа измельчения на перераспределение минеральных компонент по размерным фракциям. Полученные данные по Экибастузскому углю определяются особенностью минеральной части, которая в основном представлена глинистыми тонкодисперсными минералами.

Исследование образования шлаковых отложений было проведено на огневом стенде ИТ СО РАН. Для изучения осаждения золowych частиц был использован неохлаждаемый зонд, помещенный в центр топочной камеры. Было установлено, что при сжигании угля, измельченного в дезинтеграторе, наблюдается меньший уровень шлакования. Это обуславливалось в первую очередь меньшими размерами угольных частиц, которые огибают цилиндрический зонд, не взаимодействуя с ним. Как показал анализ массы образованных шлаковых отложений, их количество после сжигания угля, измельченного в дезинтеграторе, на 20% меньше по сравнению с ШБМ. Также было установлено, в отложениях после ШБМ имелось большее количество железистых отложений. Это в первую очередь связано с перераспределением железа по фракциям при измельчении на разных типах мельниц – обогащением мелкой фракции железосодержащими минералами.

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы о том, что измельчение в дезинтеграторе не только не ухудшает проблемы с шлакованием, но и дает возможность снизить шлакование и загрязнение поверхностей нагрева котла.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 18-08-01005).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. P. Burdukov, V. I. Popov, M. Yu. Chernetskiy, A. Dekterev and K. Hanjalić Mechanical activation of micronized coal: prospects for new combustion applications // Applied Thermal Engineering – 2015. – Volume 74. – P. 174-181
2. Влияние тонкости помола угля на характеризующие шлакование и загрязнение свойства летучей золы// Электрические станции – 2016. – № 4. – С. 17-22.

M.Yu. Chernetskiy, E.B. Butakov, A.P. Burdukov
Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRE-INTENSIVE MECHANICAL TREATMENT OF COAL TO THE FORMATION OF DEPOSITS AT PULVERIZED COAL COMBUSTION

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ
КИПЕНИИ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДОНОВ В МИКРОКАНАЛАХ**

Одной из важнейших проблем в различных областях техники в настоящее время является отвод больших количеств тепла от зон повышенного тепловыделения. Тепловые потоки для компьютерных микропроцессоров уже сейчас превышают 100 Вт/см^2 , поэтому традиционные способы охлаждения являются неэффективными [1]. Для решения этой проблемы перспективными являются микроканальные двухфазные системы охлаждения, которые используют скрытую теплоту фазового перехода для отвода больших количеств тепла при постоянной температуре теплоносителя [2], в особенности при кипении жидкости, недогретой до температуры насыщения [3]. Существуют определенные ограничения в применении микроканальных систем охлаждения, обусловленные возникновением кризиса кипения. Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена и кризиса кипения при недогретом и насыщенном кипении озонобезопасных хладонов R-236fa и R-141b в условиях вынужденной конвекции в системе щелевых микроканалов.

Эксперименты проведены в замкнутом контуре при подаче хладона из бака конденсатора плунжерным насосом через гаситель пульсаций, термостат, фильтр, измеритель расхода и подогреватель в рабочий участок. Рабочий участок представляет собой медный блок с нагревательными элементами длиной 16 мм с двумя микроканалами шириной 2 мм и глубиной 0.36 мм, разделенными стенкой толщиной 2 мм. Блок теплоизолирован прокладками из паронита, в которых прорезаны щели с зазором 640 микрон. Отношение поперечного сечения распределительной камеры к проходному сечению микроканалов равно 34.9, что позволило достигать полную конденсацию пара, выбрасываемого в камеру при возникновении пузырькового кипения. В медном блоке на расстоянии 1.2 мм и 5 мм от внутренней поверхности каналов установлены 4 термопары диаметром 0.5 мм. Эксперименты проведены в диапазоне массовых расходов от 600 до $1600 \text{ кг/м}^2\text{с}$ и тепловых потоках от 5 до 120 Вт/см^2 в условиях начального недогрева от 5 до $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Проведенные эксперименты позволили выявить области преимущественного влияния однофазной конвекции, пузырькового кипения и переходной области со значительным вкладом пузырькового кипения, установить механизм взаимосвязи гидродинамических и тепловых процессов при кипении недогретой и насыщенной жидкости. Для хладона R-236fa установлено преобладание конвективного теплообмена при тепловых потоках до

^(*) А.С. Шамирзаев alisham@ngs.ru

20 Вт/см², при тепловых потоках больше 60 Вт/см² происходит подавление пузырькового кипения и уменьшение коэффициента теплоотдачи. Экспериментально обоснован новый метод расчета теплоотдачи для недогретого и насыщенного кипения, основанный на учете подавления пузырькового кипения и испарения тонких плёнок жидкости. Установлены зависимости критического теплового потока от массовой скорости, начального недогрева и давления, проведено сравнение измеренных критических тепловых потоков с расчетом. На рис. 1 приведена зависимость теплового потока и перепада давления на рабочем участке от температурного напора для массовой скорости 1490 кг/м²с и температуры насыщения 53 °С для хладона R-236fa. Штрихпунктирная линия - расчет для пузырькового кипения в большом объеме, сплошная линия - расчет теплоотдачи по модели недогретого кипения.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №18-08-01282).

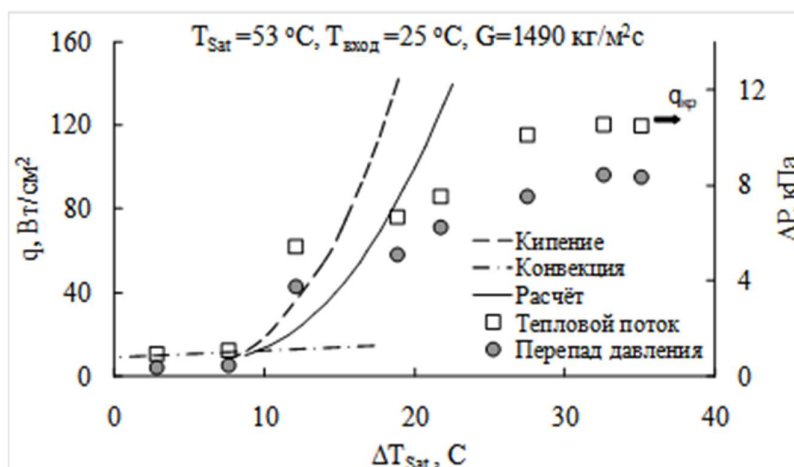


Рис. 1. Зависимость среднего теплового потока и перепада давления для кипения хладона R-236fa в сборке микроканалов

ЛИТЕРАТУРА

1. Mudawar I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management // Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013. V. 5. P. 021012.
2. Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. Int. Heat Transfer Conf. IHTC14, 2010. Washington. IHTC14-22570.
3. Zeigarnik Y.A., Privalov N.P., Klimov A.I. Critical heat flux with boiling of subcooled water in rectangular channels with one-sided supply of heat // Thermal Eng. 1981. V. 28(1). P. 40.

A.S. Shamirzaev, V.V. Kuznetsov
Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER DURING FLOW BOILING OF LOW ODP REFRIGERANTS IN MICROCHANNELS

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЦИКЛОННОГО ПРЕДТОПКА МОЩНОСТЬЮ 65 МВт

Направление по созданию, усовершенствованию, исследованию и внедрению конструкции циклонно-вихревого воздухоохладяемого предтопка (ЦВП) начато с 1970 г на кафедре “Теоретической и общей теплотехники” ДВПИ. Многолетний опыт эксплуатации модернизированных котлов малой и средней мощности, позволил выявить ряд конструктивных изменений существенно упростивших как конструкцию самого предтопка при монтаже, так и ремонтпригодность, не снижая эффективности работы котла [1]. На основании накопленной информации реконструктивные изменения были произведены в следующих элементах ЦВП: в торцевой вихревой камере (ТВК); в направляющем аппарате - завихрителе; в конструкции конуса в ТВК; в направляющей трубе форсунки; в сопловых воздушных вводах; в подходе к обмуровочным работам камеры сгорания (КС) ЦВП. Для сжигания газа в ЦВП рекомендована оптимальная область расположения газовых сопловых вводов.

Эффективность аэродинамики ТВК определяется уменьшением сопротивления самой камеры. Это было достигнуто за счёт одинарной, а не двойной закрутки воздуха в улитке ТВК, подаваемого в осевую часть предтопка. Равномерное распределение воздуха в ТВК достигнуто за счёт раздающего цилиндра рассчитанного по критерию Россби. Полученное в результате оптимальное соотношение сопротивлений на аксиальном и тангенциальном вводах, уменьшило сопротивление камеры в два раза, что позволило снизить удельный расход электроэнергии на дутье.

Объединение конуса, лопаток завихрителя и направляющей трубы в единую сборочную единицу существенно упростило монтажные работы. Организация перетока воздуха из ТВК через перфорированный конус в направляющую трубы форсунки, а также увеличение диаметра центральной области завихрителя на 20%, позволили обеспечить надежное охлаждение завихрителя, исключить эжекцию газов, заброс капель мазута на лопатки завихрителя и форсунку и как следствие увеличить время работы исключив их пережог.

Ряд проведенных на котлах исследований выявил оптимальный угол установки конуса и угол расположения лопаток завихрителя - 45о.

В связи с возникающей деформацией сопловых вводов на всех ЦВП после 700-1000 часов работы было принято решения изготавливать сопловые сегменты, между которыми предусмотрены температурные зазоры, позволяющие металлу (12X18H10T) при нагревании расширятся. Количество

^(*) К.А. Штым, shtym.ka@dvfu.ru

тангенциальных вводов воздуха выбирается в зависимости от мощности ЦВП. Три подвода воздуха осуществляется на ЦВП мощностью до 55 МВт, на ЦВП мощностью 65 МВт четыре тангенциальных ввода воздуха. Это решение позволяет формировать симметрично закрученный в КС ЦВП факел и исключить пульсации вызванные прецессией ядра многократно усиленной процессом горения.

Важным фактором надежной и долговременной работы является время прогрева предтопка, позволяющее выводить его на стабильный режим горения. С этой целью была опробована облегченная обмуровка КС ЦВП. В результате сократилось время прогрева предтопка, усилился эффект внутренней рекуперации теплоты, при этом значительно упростились футеровочные работы при двукратном снижении затрат на закупку огнеупорного кирпича.

Конструктивные изменения на мазутном ЦВП и решение по комплексному распределению газовых сопел в объёме КС ЦВП (в осевой, торцевой и тангенциальной областях КС ЦВП) позволили создать высокоэффективную усовершенствованную конструкцию газо-мазутного ЦВП мощностью 65 МВт представленную на рисунке 1.

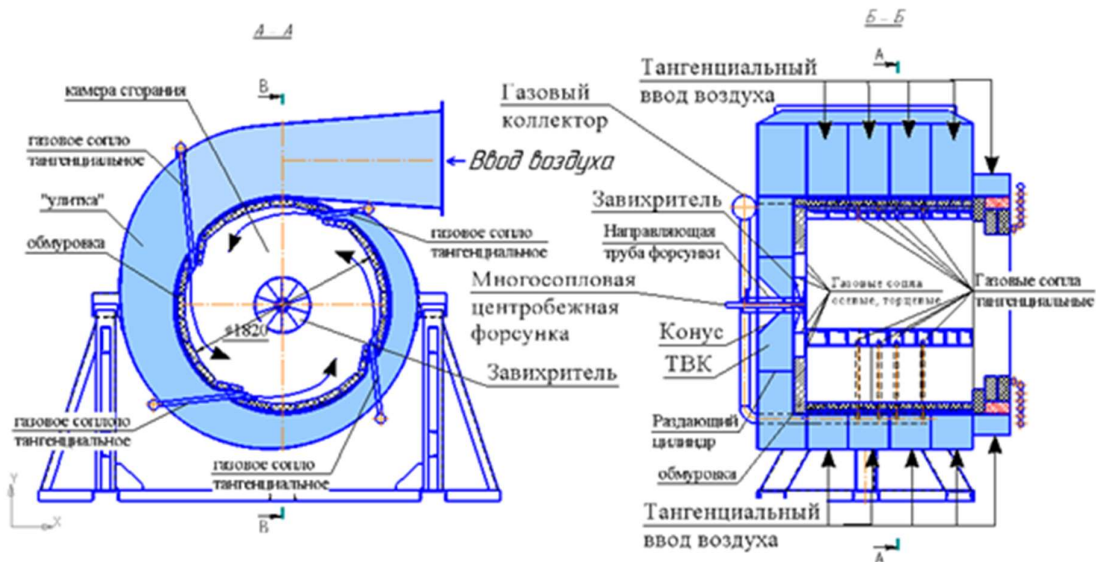


Рис. 1. Усовершенствованная конструкция газо-мазутного ЦВП

ЛИТЕРАТУРА

1. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками // Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та, 2012. – 421 с.

A.N. Shtym, K.A. Shtym, T.A. Soloveva
Far Eastern Federal University

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF 65 MW CYCLONE-VORTEX PRIMARY FURNACE

**РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА
BOILER DESIGNER**

Паровая турбина является важным элементом большинства электрических станций. Оптимизация тепловых схем ТЭС, а также повышение эффективности и экономичности работы турбоустановок является весьма актуальной задачей. Современные ПТУ представляют сложные технические системы, состоящие из сотен элементов оборудования и соединяющих трубопроводов, поэтому их расчет представляет сложный и трудоемкий процесс, который невозможно выполнить без применения компьютера и специальных программных комплексов.

В условиях реформы высшей школы использование таких программ рационализирует учебный процесс, развивает творческую самостоятельность студентов, формирует инженерный склад мышления.

Одной из таких программ является BOILER DESIGNER, разработанная фирмой OPTSIM-K (г. Москва) [1]. С ее использованием возможно выполнение на самом современном уровне теплогидравлического и аэродинамического расчетов любых типов и сложности. Программа позволяет проводить расчетные исследования работы тепловых схем паровых турбин в переменных режимах.

В качестве объекта исследования выбрана турбина К-100-90-6 производства ЛМЗ. Выбор данной турбины обусловлен наличием большого количества тепловых испытаний турбин данного типа на разных ТЭС, что в итоге выразилось в создании типовой энергетической характеристики [2].

Исходные данные для создания модели турбины на номинальном режиме взяты из энергетической характеристики. В качестве исходных данных использовались начальные и конечные параметры пара, давление по отборам турбины и внутренние относительные КПД по отсекам. Принципиальная тепловая схема рассчитывается на номинальном режиме, затем возможно проведение расчётов на частичных нагрузках. Тепловая схема с расчетными параметрами представлена на рисунке 1.

В результате полученную модель можно использовать для решения следующих задач:

1. Оценка эффективности организации движения среды в тепловой схеме;
2. Целесообразность применения тех или иных способов включения оборудования;
3. Определение КПД турбоустановки и блока в целом на разных нагрузках;

^(*) Ю.Б. Гончаренко, goncharenko.yub@dvfu.ru

4. Расчёт общестанционных параметров, характеризующих экономичность;
5. Оценка целесообразности использования турбоприводов для насосов;
6. Оценка затрат на собственные нужды блока.

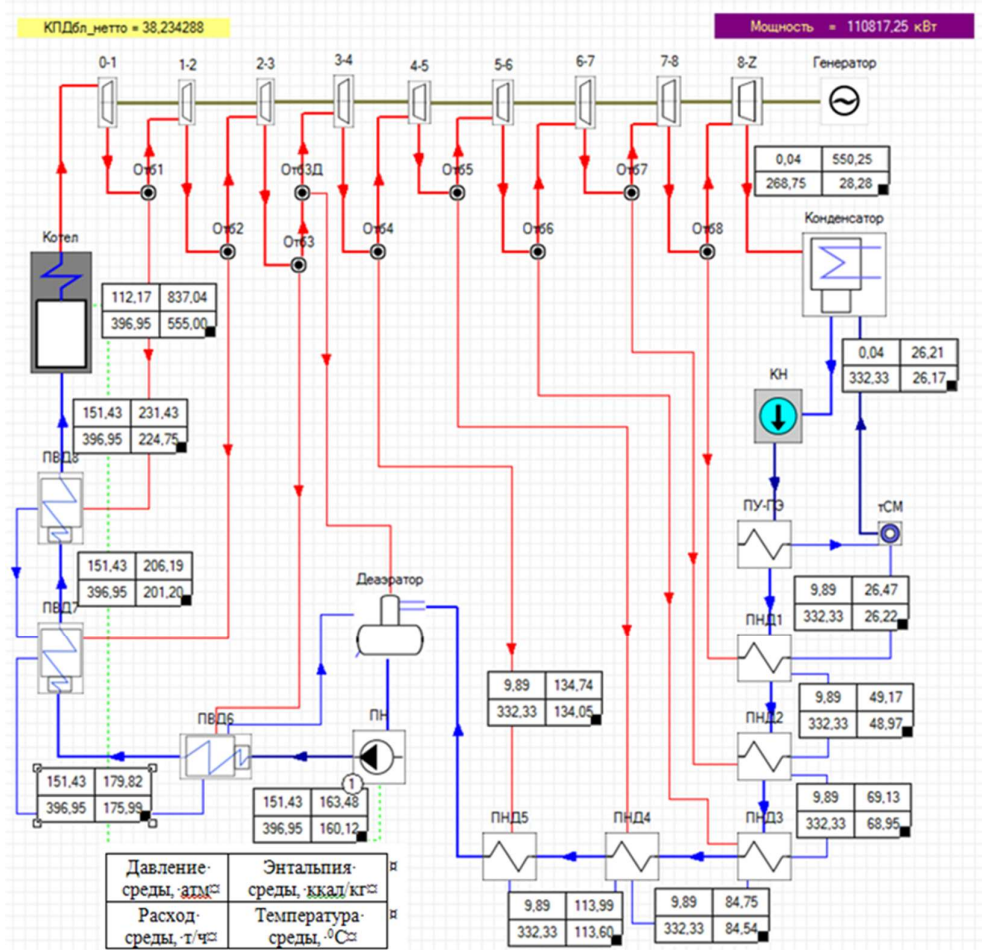


Рис. 1. Общий вид тепловой схемы турбины К-100-90-6 в программе BOILER DESIGNER после расчета

ЛИТЕРАТУРА

1. Доверман Г. И. и др. Расчет котлов-утилизаторов с использованием программного продукта boiler designer //Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – №. 2.
2. Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-100-90-6 (БК-100-6) ЛМЗ //СОЮЗТЕХЭНЕРГО. М. – 1978.

K.A. Shtym, Y.B. Goncharenko, A.V. Lesnykh, P.V. Vasiliev
Far Eastern Federal University

CALCULATION OF STEAM TURBINE ON BOILER DESIGNER SOFTWARE

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ КРУГЛОГО ДИСКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Для снижения термического влияния процесса наплавки на материал основы необходимы источники высококонцентрированного нагрева, позволяющие локализовать подводимое тепло и тем самым дозировать степень нагрева заготовки. Таким требованиям удовлетворяет нагрев плазменной дугой, позволяющий наиболее полно использовать свойства наплавляемого металла и материала основы.

Для решения рассматриваемой задачи теплообмена произведена схематизация теплового процесса плазменной наплавки. На адиабатной плоской поверхности цилиндрического диска $z = 0$ по круговой траектории радиуса r_1 с угловой скоростью ω движется источник тепла плазматрона с заданным законом распределения мощности $q(r, \varphi, z, t)$. Нижняя плоскость диска $z = h$ охлаждается по закону конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи α . На периферийной цилиндрической поверхности диска при $r = r_0$ теплообмен отсутствует. Тепловое воздействие плазменных потоков энергии на изделие соответствует нормально - круговому закону распределения [1]. Материал изделия принимаем однородным с постоянными, не зависящими от температуры теплофизическими характеристиками. С учетом принятых допущений запишем математическую формулировку тепловой задачи плазменной наплавки цилиндрического диска конечной толщины в критериальной форме в подвижной системе координат, связанной с источником тепла в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} + Pe \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right) - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} = Po(\rho, \varphi, Fo) \delta(\zeta)$$

$$\text{НУ: } \theta \Big|_{Fo=0} = 0; \quad \text{ГУ: } \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \Big|_{\rho=0} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} = 0$$

$$\theta(\rho, \varphi, \zeta, Fo) = \theta(\rho, \varphi + 2\pi, \zeta, Fo), \quad \frac{\partial \theta(\rho, \varphi, \zeta, Fo)}{\partial \varphi} = \frac{\partial \theta(\rho, \varphi + 2\pi, \zeta, Fo)}{\partial \varphi}.$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=\zeta_0} = -Bi_0 \theta \Big|_{\zeta=\zeta_0}.$$

Здесь введены следующие обозначения: $\theta = (T - T_0)/(T_M - T_0)$ – безразмерная относительная температура; T, T_0, T_M – текущая, начальная, масштабная температуры соответственно; $\rho = r\sqrt{k}$ – текущий безразмерный

^(*) Ю.М. Яньюшкин, yugym.yan@yandex.ru

радиус изделия; k – коэффициент сосредоточенности источника, m^{-2} ; $R = 1/\sqrt{k}$ – характерный размер системы, m ; $d_n = 3,46/\sqrt{k}$ – условный диаметр пятна нагрева, m ; φ – угловая координата, рад; $\zeta = z\sqrt{k}$ – координата по толщине диска; $\rho_1 = r_1\sqrt{k}$ – координата центра пятна нагрева теплоисточника; $\rho_0 = r_0\sqrt{k}$ – наружный радиус диска; $\zeta_0 = h\sqrt{k}$ – толщина диска; $Fo = a \cdot t \cdot k$ – критерий Фурье; τ – текущее время, s ; $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности материала изделия, m^2/s ; λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м\cdotК)$; c – массовая теплоемкость материала, $Дж/(кг\cdotК)$; ρ – плотность, $кг/м^3$; $Pe = \omega/(a \cdot k)$ – критерий Пекле; $\omega = \pi n/30$ – угловая скорость вращения изделия (диска), s^{-1} , n – частота вращения диска, $об/мин$; $W = \omega r_1$ – линейная скорость движения центра теплоисточника, $м/с$; $Bi = \alpha/(\lambda\sqrt{k})$ – критерий Био; $\delta(\zeta)$ – обобщенная дельта – функция; $Po = q_0/(\lambda\sqrt{k}(T_M - T_C))$ – критерий Померанцева; $q_0 = Qk/\pi$ – удельный тепловой поток в центре плазменной дуги, $Вт/м^2$; Q – общая эффективная мощность плазменной дуги, $Вт$.

Закон изменения интенсивности тепловыделения $q(r, \varphi, \tau)$ в безразмерном виде выглядит следующим образом:

$$Po(\rho, \varphi, Fo) = [H(Fo) - H(Fo - Fo_0)]Po_0(Fo)e^{-(\rho-\rho_1)^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\rho_1^2(\varphi+2\pi n)^2},$$

где t_0 , $Fo_0 = a \cdot k \cdot t_0$ – размерная и безразмерная длительность действия источника соответственно; $H(t)$ – единичная функция.

С помощью аналитических методов получено точное решение задачи. Применение методов расщепления решений на ортогональные составляющие, на постоянные и переменные составляющие в периодических процессах теории теплопроводности, методов теории возмущения и асимптотических разложений позволило получить приближенные решения задачи, эффективные для инженерных приложений [1,2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Н. Рыкалин. Об условиях расщепления решений линейного параболического уравнения на ортогональные составляющие /ДАН СССР. –1959. Т. 125. С. 519-522.
2. Н.В. Дилигенский, Ю.П. Камаев К исследованию периодических процессов в теории теплопроводности. В кн.: Тепло- и массоперенос. Минск, ИТМО АН БССР. 1968. Т.8. С. 252-257.

Yu.M. Yanushkin
National University of Science and Technology «MISIS»

SOLUTION OF THE PROBLEM OF HEAT EXCHANGE DURING THE PLASMA MELTING OF A DISK, DETERMING PARAMETERS OF THE PROCESS AND ITS CONTROL

ОГЛАВЛЕНИЕ

Абрамов А.Г., Смирнов Е.М., Смирнов С.И.

Вихреразрешающее численное моделирование конвекции расплава кремния в тигле метода чохраньского: влияние излучения со свободной поверхности 8

Авдеев Е.Э., Булович С.В.

Моделирование кризиса теплообмена второго рода с использованием раздельной по жидкой пленке и парокапельному потоку формулировке 10

Азиханов С.С., Богомолов А.Р., Дронов Е.Н.

Исследование эффективности работы карьерных самосвалов белаз на газодизельном топливе 12

Алексеев М.В., Вожяков И.С., Кудашов И.Г., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А.

Кросс-верификация теплогидравлических кодов для задач инъекции газа в жидкости с разной плотностью 14

Алексеев М.В., Лобанов П.Д., Светоносков А.И., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А.

Моделирование инъекции газа из длинной трубки через малое отверстие в канал, заполненный жидкостью 16

Алчагиров Б.Б., Кясова О.Х., Латипов А.Л., Дышекова Ф.Ф., Хибиев А.Х., Лесев В.Н.

Поверхностное натяжение жидкого галлия в атмосферах азота и воздуха 18

Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б., Дадашев Р.Х., Дышекова Ф.Ф., Таова Т.М., Кясова О.Х.

Внедрение в учебную практику новых изобретений и патентов: приборы и методы для измерения плотности и поверхностного натяжения жидкометаллических расплавов..... 20

Аляудинов А.Р., Антипов А.В., Власенко Г.П.

Применение теплового насоса при атмосферной сублимационной сушке 22

Amer A.E., Lebedev V.A.

Numerical investigations on latent heat storage unit using phase change material.... 24

Андреева Т.А., Белянкин А.Б., Беркович А.Е., Быков Н.Ю., Козырев С.В., Лукин А.Я.

Тепловая абляция биологической ткани под действием ультразвука высокой интенсивности 26

Антипов А.В., Аляутдинов А.Р., Егорова А.И., Попов Д.Е. Аппаратурное оформление процесса атмосферной сублимационной сушки гранулированной пищевой продукции	28
Аракелян Э.К., Андрюшин А.В., Пикина Г.А., Мезин С.В., Косой А.А. Моделирование гидродинамических процессов проточной части паровой турбины при ее работе в беспаровом и моторном режимах.....	30
Аракелян Э.К., Султанов М.М., Сабанин В.Р., Горбань Ю.А. Повышение энергоэффективности оборудования ТЭС путем оперативного управления ТЭП.....	32
Арбатский А.А., Глазов В.С. Анализ системы дисциплин для подготовки инженеров-конструкторов климатической техники с учетом требований современных производств	34
Артемов В.И., Макаров М.В., Минко К.Б., Яньков Г.Г. Моделирование методом LES турбулентного течения электропроводящей жидкости в канале при воздействии поперечного магнитного поля	36
Артемов В.И., Макаров М.В., Яньков Г.Г., Минко К.Б. Численный анализ турбулентного течения CO ₂ сверхкритического давления в вертикальных обогреваемых трубах с использованием LES-технологии	38
Бабенко Д.Д., Дмитриев А.С., Михайлова И.А. О термогидродинамических процессах испарения и кипения на поверхностях функциональных наноматериалов	40
Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р., Сапожников С.З. Градиентная теплотметрия в исследовании теплообмена при конденсации водяного пара в трубах	42
Багаев Д.В., Сыралёва М.Н., Кудинович И.В. Повышение энергоэффективности систем обогрева судовых цистерн	44
Базюк С.С., Кузма-Кичта Ю.А., Паршин Н.Я., Полунин К.К., Солдаткин Д.М. Расчетно-экспериментальное исследование высокотемпературного окисления образцов оболочек толерантных твэлов из молибдена в водяном паре	46
Байдаков В.Г. Достижимый перегрев криогенных жидкостей и их растворов	48
Байдаков В.Г., Гурашкин А.Л., Акашев А.А. Оптоволоконная рефлектометрия метастабильных жидкостей	50

Барбин Н.М., Кобелев А.М., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Теплофизические характеристики системы радиоактивный графит-CuO-Na ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃ -NaCl-KCl в атмосфере аргона.....	52
Баринов А.А., Хвезюк В.И. Моделирование процессов взаимодействия фононов с границами образца	54
Белавина Е.А., Бирюков Д.А., Листратов Я.И., Котляр А.В., Беляев И.А., Свиридов В.Г. Исследование особенностей смешанной конвекции имитаторов расплава солей в магнитном поле	56
Беляев А.В., Дедов А.В., Заноско А.И. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при кипении R125 в круглом канале диаметром 0.95 мм в условиях высоких приведенных давлений	58
Беляев И.А., Пятницкая Н.Ю., Сардов П.А., Свиридов В.Г. МГД-теплообмен при смешанной конвекции жидкого металла в условиях неоднородного обогрева.....	60
Березина Т.С., Власенко Г.П. Моделирование процесса теплообмена при хранении зерна в силосной конструкции	62
Бойко Е.А., Страшников А.В. Когенерационная энергетическая установка на основе газификации твердого органического топлива для нужд малой распределённой энергетики Красноярского края.....	64
Бондарева Н.С., Шеремет М.А. Особенности теплопереноса в системе, содержащей материал с фазовым переходом, в условиях нестационарных тепловых нагрузок	66
Борейшо А.С., Вовк М.Ю., Едигарев А.Д., Киселев И.А., Кулалаев В.В., Морозов А.В., Орлов А.Е., Смирнов П.Г. Газодинамический СО ₂ -лазер на горении на базе современных авиационных ГТД	68
Борисова Н.Г., Илиев И.К., Сегеда Т.А., Туменбаева М.Т. Исследование термодинамических характеристик водяного пара	70
Бухаров А.В., Вишневский Е.В., Гиневский А.Ф. Инжекция жидких высокоскоростных криогенных струй в вакуум.....	72

Валиуллин Т.Р., Глушков Д.О., Паушкина К.К. Интенсификация выгорания композиционного топлива в условиях диспергирования	74
Валуева Е.П., Зюкин В.С. Гидродинамика развивающегося пульсирующего ламинарного течения в плоском канале в квазистационарной области.....	76
Вальцев Н.В., Рыжков А.Ф. Выбор конструкции высокотемпературного воздухонагревателя для парогазовой установки с внутрицикловой газификацией	78
Вальцева А.И., Калякин А.С., Волков А.Н., Першин П.С., Суздальцев А.В., Зайков Ю.П. Разработка датчика контроля кислорода для реакторов пирохимической переработки ОЯТ	80
Величко В.И., Шарапов В.С. Повышение энергетической эффективности районных тепловых пунктов при проектировании и эксплуатации	82
Веретенников С.В., Евдокимов О.А. Влияние интенсивности закрутки на теплоотдачу комбинированной импактной струи	84
Веретенников С.В., Евдокимов О.А., Сергеев М.Н. Оценка глубины активного воздействия электрического поля на поверхность испаряющейся жидкости	86
Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С. Совместное сжигание угольных, древесных и бытовых отходов	88
Ветренко А.А., Антаненкова И.С. Термодинамический анализ эффективности цикла утилизационной установки для газотранспортных систем	90
Виноградов Д.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Тепляков И.О. Получение аморфных металлогидридных материалов методом парового взрыва	92
Виноградов Д.А., Тепляков И.О., Ивочкин Ю.П. Воздействие внешнего магнитного поля на интенсивность электровихревого течения.....	94

<i>Винцаревич А.В., Митяков А.В., Герасимов Д.В., Ямашкин М.В.</i> Исследование теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя при работе на холостом ходу методом градиентной теплотметрии	96
<i>Волков Р.С., Стрижак П.А., Кузнецов Г.В., Войтков И.С.</i> Трансформация массивов жидкости при их свободном падении	98
<i>Воронцова Е.С., Гиль А.В., Кокишарев М.О.</i> Численное исследование процессов горения в топке энергетического котла с вихревыми горелочными устройствами	100
<i>А.С. Гавриш</i> Особенности механизма процесса и закономерностей теплообмена при капельной конденсации для простых теплообменных аппаратов.....	102
<i>Геллер Ю.А., Антаненкова И.С., Шацких Ю.В.</i> Исследование псевдооживления в процессе сушки гранулированных гидрофобных полимеров	104
<i>Глушков Д.О.</i> Механизм и характеристики зажигания гелеобразных топлив на основе безмасляных и маслonaполненных криогелей с мелкодисперсными частицами угля.....	106
<i>Глушков Д.О., Паушкина К.К., Шабардин Д.П.</i> Перспективы перевода угольных ТЭС на композиционное топливо для совместной утилизации промышленных и бытовых отходов.....	108
<i>Гогонин И.И.</i> Экспериментальные исследования влияния гидродинамики на теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных ребренных труб	110
<i>Гранченко П.П., Кузнецов К.И., Сухих А.А., Скородумов С.В.</i> Экспериментальное исследование плотности октафторциклобутана в жидкой и сверхкритической области состояний.....	112
<i>Гусева О.В., Бутакова М.В., Орлов К.А., Губин Д.В.</i> Исследование возможности применения коррекционного водно-химического режима на ГТУ-ТЭС с использованием реагентов АМИНАТ	114
<i>Давлетшин И.А., Шакиров Р.Р., Паерелий А.А.</i> Теплоотдача при турбулизации потока в диффузоре	116

<i>Данилишин А.М., Кожухов Ю.В., Аксенов А.А.</i> Тестирование численной модели центробежной компрессорной ступени промежуточного типа	118
<i>Деев Равад, Сиденков Д.В., Ежов Е.В., Понуровская В.В.</i> Расчет теплообмена излучением в пучке труб каплевидной формы	120
<i>Дектерев А.А., Филимонов С.А., Мешкова В.Д., Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Шебелев А.В.</i> Численное моделирование динамики атмосферы города Красноярска для различных метеорологических условий	122
<i>Деревич И.В., Клочков А.К.</i> Моделирование теплового взрыва на основе решения уравнения для функции плотности вероятности флуктуаций температуры частиц	124
<i>Дмитриев А.С., Иевлев Н.Ф.</i> Особенности поверхностной генерации пара графеновыми нанослоями под действием теплового спектра излучения.....	126
<i>Дмитриев А.С., Клюев Н.Е.</i> Особенности замораживания капель графеновых наножидкостей на подложках различной морфологии	128
<i>Довгялло А.И., Некрасова С.О., Сармин Д.В., Пулькина А.Ю.</i> Индикаторные характеристики свободнопоршневого двигателя с пульсационной трубой.....	130
<i>Донской И.Г.</i> Математическое моделирование образования агломератов в реагирующей пористой среде с меняющейся проницаемостью	132
<i>Донской И.Г., Мисюра С.Я.</i> Оценка кинетических коэффициентов диссоциации газовых гидратов при $T < 273$ К.....	134
<i>Дугур И.И., Савченкова Н.М., Йовичич В., Дельгадо А.</i> Исследование влияния кривизны мениска жидкости в капиллярной канавке на коэффициент теплопередачи при испарении	136
<i>Евдокимов О.А., Гурьянов А.И.</i> Теплофизические особенности распространения диффузионных и комбинированных закрученных реагирующих струй в условиях свободной конвекции	138

<i>Егоров М.Ю., Аксенов П.Л., Иванов А.И., Коваленко И.И., Литвинова Н.Н., Лавровская Н.П., Кректунова И.П., Критченков А.С.</i> Совершенствование промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин АЭС	140
<i>Егоров М.Ю., Касаткин И.И., Иванов А.И., Коваленко И.И., Литвинова Н.Н., Лавровская Н.П., Кректунова И.П., Критченков А.С.</i> Повышение энергетической эффективности теплообменного оборудования системы промежуточной сепарации и перегрева пара Смоленской АЭС	142
<i>Ежов Е.В., Понуровская В.В., Колотухин С.П., Мазурин И.М.</i> Конденсация водяного пара в присутствии фторуглеродов на турбулентной струе жидкости.....	144
<i>Елсуков В.К., Огар П.М.</i> Совершенствование схем удаления золы из бункеров золоуловителей на основе моделирования	146
<i>Жигарев В.А., Минаков А.В., Неверов А.Л., Пряжников М.И.</i> Расчетно-экспериментальное исследование выносной способности бурового раствора	148
<i>Зайченко В.М., Ларина О.М.</i> Производство синтез-газа из осадка сточных вод с целью дальнейшего синтеза биометанола	150
<i>Замалеев М.М., Губин И.В., Шаранов В.И.</i> Возможности повышения эффективности ТЭЦ за счет оптимизации режима работы баков-аккумуляторов	152
<i>Замятина А.В., Вальцева А.И., Карамазова К.М.</i> Система очистки натрия I контура реактора БН-800 Белоярской атомной станции	154
<i>Заричняк Ю.П., Иванов В.А., Марова А.А., Пилипенко Н.В.</i> Структура и теплопроводность углеродных фуллереновых нано-«луковиц» .	156
<i>Засимова М.А., Иванов Н.Г., Подмаркова А.Д., Рис В.В., Щур Н.А.</i> Естественная тяга воды через гладкотрубный пучок при различной конфигурации элементов ограждения	158
<i>Зуева Т.С., Гаряев А.Б., Вайсс Л.</i> Уточнение модели расчёта характеристик струи жидкого топлива в сносящем потоке газа.....	160

Иванов Н.Г., Левченя А.М.

Вопросы построения вычислительного практикума по решению многомерных задач гидрогазодинамики и теплофизики..... 162

Исаев А.П., Плотников Л.В.

Направления совершенствования образовательных программ разного уровня в вузе..... 164

Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., Егорова А.Г.

Энергоэффективные поверхности воздушных конденсаторов с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками и выступами..... 166

**Каледин В.О., Вячкина Е.А., Гилёва А.Е., Вячкин Е.С., Галдин Д.А.,
Ульянов А.Д.**

Модель тепломассопереноса в отапливаемых помещениях..... 168

Канин П.К., Забиров А.Р., Ягов В.В.

Плёночное кипение недогретых растворов этанола и иодида натрия 170

Киричков В.С., Прохоров В.Б., Чернов С.Л., Каверин А.А.

Исследование взаимодействия турбулентных струй в топках с прямоточными горелками для котлов большой мощности 172

**Кирюхин А.В., Лошкарева Е.А., Кондратьев А.В., Корлякова М.О.,
Милосердов В.О.**

Сравнительный анализ возможности снижения передачи вибрации через компенсатор трубопровода путем подавления динамических сил и пульсаций давления активными методами 174

**Кирюхин А.В., Мильман О.О., Серезжин Л.Н., Корлякова М.О.,
Милосердов В.О.**

Физические особенности взаимодействия жидкости и структуры в виброизолирующих компенсаторах трубопроводов энергетических установок 176

Китанин Э.Л., Китанина Е.Э., Бондаренко Д.А.

Методика расчёта процесса насыщения авиационного топлива воздухом 178

Козлов А.Н., Пензик М.В., Марченко О.В., Соломин С.В.

Экспериментальные исследования многоступенчатой газификации древесных отходов..... 180

Козлова М.А., Ральников П.А., Свищев Д.А.

Исследование циклического перемещения пламени по поверхности горячей в потоке воздуха древесной частицы 182

Колесник Е.В., Смирновский А.А., Смирнов Е.М. Влияние сжимаемости на турбулентный теплообмен, интенсифицируемый вихревыми подковообразными структурами, формирующимися при обтекании установленного на пластине затупленного тела	184
Колесник Е.В., Смирновский А.А., Щур Н.А., Иванов Н.Г., Смирнов Е.М. Опыт применения генератора синтетической турбулентности при расчетах свободноконвективного пограничного слоя на вертикальной пластине вихреразрешающим методом	186
Колесников Б.П. Единый подход к определению индекса эффективной проводимости перколяционного кластера в макроскопически неупорядоченных средах.....	188
Коновалов Д.А., Рязских В.И., Дроздов И.Г., Шматов Д.П., Кожухов Н.Н. Экспериментальное исследование теплообмена в компактном пористом теплообменнике из вспененного алюминия	190
Handawy M. Koraiem, Hegazy A.A., Dahab O.M., Koura N.S. Experimental study of partially premixed–diffusion turbulent flame with circular plate bluff-body.....	192
Handawy M. Koraiem, Snegirev A.Yu., Stepanov V.V., Talalov V.A. Kinetic modeling pyrolysis and combustion of high-density polyethylene blends ..	194
Короткова Т.И., Колесник С.А., Гарибян Б.А., Лунёва С.Ю., Кузьмина Я.В. Многокритериальная модель управления принятием решения с неопределенностями в большой системе теплоснабжения	196
Косов В.Н., Федоренко О.В., Мукамеденкызы В., Калимов А. Особые режимы диффузионного массопереноса в изотермических тройных газовых смесях	198
Косов В.Н., Федоренко О.В., Мукамеденкызы В., Тукен М. Диффузионные и конвективные режимы смешения бинарной смеси газов, растворенной в третьем компоненте.....	200
Костюнин В.В., Потапов В.Н., Капралов Д.А. Аэродинамические проблемы при разработке новых вихревых газогенераторов и топков	202
Котикова М.Р., Левченя А.М., Засимова М.А., Смирнов Е.М. Свободно-конвективный пограничный слой на вертикальной пластине, возмущаемый поперечным рядом цилиндрических препятствий: численное моделирование на основе RANS-подхода	204

<i>Кравцов Д.А., Савченкова Н.М.</i> Глубокая утилизация теплоты влажных газов с помощью пластинчатого рекуператора в системах вентиляции	206
<i>Кузнецов В.В.</i> Гидродинамика и тепломассоперенос при фазовых переходах и химических реакциях в микроструктурных системах	208
<i>Кузнецов Г.В., Янковский С.А.</i> Механизм секвестрирования оксидов азота и серы при сжигании углей с добавками древесной биомассы	210
<i>Лазебный И.П., Филиппов П.С., Рыжков А.Ф.</i> Разработка и верификация термодинамической модели для расчета парогазового цикла	212
<i>Ларионов К.Б., Слюсарский К.В., Мишаков И.В.</i> Интенсификация процесса окисления энергетического угля и кокса оксидами металлов и их предшественниками.....	214
<i>Лебедев А.А., Лебедева С.М., Минь Хай Нгуен</i> Моделирование нестационарных картин течения в ступени НС центробежного компрессора с измененной геометрией одной лопатки.....	216
<i>Леухин Ю.Л., Панкратов Е.В.</i> Интенсификация теплоотдачи в кольцевом канале рекуперативного устройства с закрученным течением теплоносителя	218
<i>Листратов Я.И., Губаревич Т.А.</i> Прямое численное моделирование смешанной конвекции при подъемном МГД-течении жидкого металла в вертикальном обогреваемом канале	220
<i>Литун Д.С., Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Шорина Е.А.</i> Фрагментация и агломерация биомассы при пиролизе и сжигании в кипящем слое.....	222
<i>Лобанов П.Д., Меледин В.Г., Прибатурин Н.А., Светоносков А.И., Щепихин И.В.</i> Экспериментальное исследование вибрации вертикального стержня в потоке жидкости.....	224
<i>Лобанов П.Д., Светоносков А.И., Усов Э.В.</i> Экспериментальное изучение движения расплава металла по поверхности нагреваемого стержня.....	226

Лобасов А.С., Минаков А.В. Экспериментальное исследование влияния материала наночастиц на скорость испарения наножидкостей.....	228
Майсюк Е.П., Козлов А.Н. Использование технологии термоподготовки угля для экологически чистого сжигания топлива в котельных малой мощности	230
Малахов А.О., Ларионов В.М. Ионизация смеси пропан-бутана с воздухом в вихревой камере пульсационного горения.....	232
Мамедов Ф.Г., Савченкова Н.М. Экспериментальное исследование использования термосифона в системах вентиляции и кондиционирования.....	234
Мансуров Р.Ш., Рудяк В.Я. Экспериментальное изучение функционирования системы нагреватель-вентилятор в переменных режимах работы	236
Марасанов Н.В. Оптимизация параметров энергетической установки на основе циклов Отто и Ренкина	238
Маркелов А.Ю., Кудринский А.А., Анпилов С.В., Ширяевский В.Л. Моделирование физико-химических процессов при переработке органических отходов методом высокотемпературного окисления в шлаковом расплаве	240
Марченко О.В., Соломин С.В., Козлов А.Н., Шаманский В.А. Использование газогенераторных электростанций для повышения экономичности автономных систем электроснабжения в России	242
Марьина З.Г., Новожилова А.В., Львов Е.А., Верецагин А.Ю. Исследование горизонтальных однорядных пучков труб с ленточным оребрением при свободной конвекции	244
Масюкевич А.В., Булович С.В. Экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны со слоем проницаемого материала	246
Мелехин А.А. Исследование работы ветроэнергетической установки при моделировании различных параметров ее работы.....	248

Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Филимонов С.А. Исследования режимов обтекания городских микрорайонов ветровыми потоками	250
Милютин В.А. Экспериментальные данные по плотности газовой системы He – N ₂ – He при низких температурах. Уравнение состояния этой газовой системы	252
Минко К.Б., Артемов В.И., Яньков Г.Г., Крылов В.С. Моделирование процессов конденсации водяного пара из парогазовой смеси при поперечном обтекании горизонтального трубного пучка	254
Минко К.Б., Нащекин М.Д., Минко М.В. Численный анализ эффективности различных методов интенсификации процессов теплопереноса внутри металлургических систем очистки водорода	256
Мирнов С.В., Комов А.Т., Варава А.Н., Дедов А.В., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Захаренков А.В. Экспериментальное исследование теплообмена при охлаждении рабочего участка диспергированным потоком теплоносителя при индукционном нагреве	258
Митрофанова О.В. Влияние вихревой структуризации течений на гидродинамику и теплообмен в сложных энергетических и гидромеханических системах	260
Митяков В.Ю., Зайнуллина Э.Р., Бабич А.Ю., Митяков А.В. Градиентная теплотририя в исследовании теплообмена при конденсации водяного пара на трубах	262
Михайлов Е.А., Тепляков И.О., Федотов И.А. Исследование электровихревого течения в жидком металле при различных токах	264
Михеев Н.И., Душин Н.С., Душина О.А., Шакиров Р.Р. Связь теплообмена с микроструктурой турбулентного потока в дискретно шероховатом канале	266
Моисеев А.А., Никольский В.Е., Смирнов П.Г., Савин А.В. Импульсно-периодическая метано-кислородная детонационная горелка мощностью 7 МВт для металлургических применений: моделирование и практическая реализация	268

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Хакимов А. Устойчивость горения взвеси угольной пыли в закрученном канале.....	270
Молдабекова М.С., Асембаева М.К., Красиков С.А., Нуртай Г.А. Особенности диффузионного и конвективного смешения в смесях, содержащих углеводороды	272
Молочников В.М., Михеев Н.И., Михеев А.Н., Саушин И.И. SIV измерения турбулентной структуры течения в ближнем следе поперечного кругового цилиндра	274
Молчанов А.М., Акимов Д.В. Оптимизация параметров рабочего процесса в камере дожигания комбинированного двигателя при сверхзвуковом горении гетерогенного топлива	276
Молчанов А.М., Попов В.Э. Расчет излучения и газовой динамики струй, истекающих в разреженное пространство, на основе квазигазодинамических уравнений	278
Моргунова М.О., Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. Будущее энергетического комплекса арктической зоны Российской Федерации с точки зрения устойчивого развития	280
Назарычев С.А., Сайфуллин Э.Р., Ларионов В.М. Оптимальные режимы работы экспериментальной водонагревательной установки, использующей смесь метана и пропан-бутанового топлива	282
Немировский Ю.В., Мозгова А.С. Теплопроводность газгольдеров при хранении газа	284
Низай Н.А., Сыродой С.В. Сравнительный анализ эффективности сушки биомасс на основе лесных горючих материалов и отходов лесопиления	286
Никитин П.В., Шкуратенко А.А. Алгоритм экспериментального определения коэффициента каталитической активности для расчёта плотности теплового потока.....	288
Няшина Г.С., Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Оценка перспектив использования суспензионных топлив, приготовленных из отходов углеобогащения	290

Онохин Д.А., Орехов А.Н., Карнов С.В., Коноплев М.И. Аэродинамика, конвективный теплообмен и энергетическая эффективность циклонных устройств большой относительной длины.....	292
Орлов М.Е., Кузьмин А.В., Шарапов В.И. О перспективах использования теплоты основного конденсата теплофикационных турбин для подогрева различных теплоносителей	294
Охотин В.С., Джураева Е.В. Параметры газа при необратимом истечении из сопл	296
Очков В.Ф., Устюжанин Е.Е., Орлов К.А., Тун А.Т.Р. Оптимизация термодинамических циклов для ГТУ и ПГУ – КУ на основе интернет технологии.....	298
Панов Д.О., Рис В.В., Смирнов Е.М. Многокритериальная оптимизация течения и теплообмена в канале с резким поворотом на 180 градусов.....	300
Пеньковский А.В., Стенников В.А. Моделирование интегрированных энергетических рынков.....	302
Петин С.Н., Голдобин Д.Д., Бурмакина А.В. Разработка мультигенерирующего комплекса с комбинированным топливом при производстве водорода и кислорода.....	304
Петров Л.В., Корценштейн Н.М. Численное моделирование формирования субмикронных частиц при сжигании углей с учетом коагуляции и запыленности продуктов сгорания.....	306
Петрова Т.И., Селиванов Е.А. Определение форм существования соединений алюминия в системе Al – H ₂ O применительно к условиям работы сухих градирен	308
Печенегов Ю.Я., Косов А.В., Косова О.Ю., Грачева Ю.А. Способы и средства энергосбережения в паровых теплообменниках	310
Пилипенко Н.В., Заричняк Ю.П. Параметрическая идентификация дифференциально-разностных моделей теплопереноса в системах тел	312
Платонов И.М., Быков Л.В. Газодинамические эффекты взаимодействия сверхзвуковых струй.....	314

<i>Плотников Л.В., Кочев Н.С., Мисник М.О.</i> Спектральный анализ газодинамических процессов во впускной системе поршневого двигателя с наддувом.....	316
<i>Пономарев К.О., Кузнецов Г.В.</i> Экспериментальные исследования процессов теплопереноса в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона	318
<i>Порязов В.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А.</i> Математическая модель и результаты расчета скорости горения аэрозоля керосина.....	320
<i>Постников И.В., Стенников В.А.</i> Методы и модели анализа и оптимизации надежности централизованно-распределенных теплоснабжающих систем с активными потребителями.....	322
<i>Постников И.В., Стенников В.А., Пеньковский А.В.</i> Исследование надежности схем гибридных энергоисточников на базе ТЭС и ВЭС.....	324
<i>Прохоров В.Б., Чернов С.Л., Киричков В.С., Фоменко Н.Е.</i> Разработка и моделирование инвертной топки котла на ультрасверхкритические параметры пара	326
<i>Пряжников М.И., Минаков А.В., Жигарев В.А.</i> Электроакустическое исследование суспензий с наночастицами	328
<i>Размыслов А.В., Султанов В.Г.</i> Математическое моделирование газификации охладителя в низкотемпературном газогенераторе.....	330
<i>Рафальская Т.А., Рудяк В.Я.</i> Моделирование характеристик теплообменников систем теплоснабжения в переменных режимах работы	332
<i>Рекуненко Е.С., Горяев А.Б.</i> Влияние температуры теплоносителя на оптимальные характеристики отопительного конвектора.....	334
<i>Рудяк В.Я., Минаков А.В., Гузей Д.В., Лобасов А.С.</i> Конвективная теплопередача наножидкостей в ламинарном режиме. Эксперимент и моделирование	336

<i>Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А.</i> Метод построения фундаментального уравнения состояния, основанный на соотношениях теории подобия и масштабной гипотезе.....	338
<i>Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Свердлов А.В., Рыков В.А.</i> Особенности построения фундаментальных уравнений состояния удовлетворяющих требованиям масштабной гипотезы	340
<i>Рябов Г.А., Фоломеев О.М.</i> Сепарация и возврат уловленных частиц в аппаратах с циркулирующим кипящим слоем.....	342
<i>Саломатов В.В.</i> Экологически перспективная ТЭС на принципе многопродуктового комплекса при вихревом сжигании Березовского угля Канско-Ачинского бассейна.....	344
<i>Сангадиев А.Л., Терехов В.В.</i> Применение метода решёточных уравнений Больцмана для изучения динамики взаимодействия параллельных министруй	346
<i>Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Субботина В.В.</i> Градиентная теплометрия в исследовании теплообмена при кипении недогретой воды на поверхности шара.....	348
<i>Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Васильева О.Б., Ширяев В.Н.</i> Разработка и исследование возможности применения плазменного оборудования для получения синтез газа	350
<i>Свердлов А.В., Волков А.П., Волков М.А., Рыков С.В., Гулиянц М.М.</i> Энергоэффективность и экономия ресурсов за счет проектного решения об использовании реверсивной струйной системы вентиляции 4-х этажной подземной автостоянки в НКЦ Казани.....	352
<i>Семенёв П.А., Афанасьев В.Н., Дехай Кон</i> Численное определение влияния размеров конфузорной щели в прямоугольном выступе при интенсификации теплообмена на плоской пластине	354
<i>Сенченко В.Н., Беликов Р.С.</i> Экспериментальное исследование теплофизических свойств рения в области плавления.....	356
<i>Сердюков В.С., Суртаев А.С., Малахов И.П.</i> Особенности теплообмена и динамики парообразования при кипении жидкости в области субатмосферных давлений	358

<i>Сериштанов В.В., Гусаков А.А., Греков М.А.</i> Комплексное исследование течения и теплообмена при обтекании трубы с кольцевыми ребрами	360
<i>Серяков А.В.</i> Исследование вихреобразования в паровом канале коротких низкотемпературных тепловых труб при больших тепловых нагрузках.....	362
<i>Серяков А.В., Конькин А.В., Алексеев А.П.</i> Резонансное вибрационное повышение коэффициента теплопередачи коротких низкотемпературных тепловых труб при больших тепловых нагрузках.....	364
<i>Скурихин А.В., Костановский А.В.</i> Анализ линейности изменения температуры в плоском слое термовермикулита.....	366
<i>Соломин И.Н., Даминов А.З., Камалов Р.Ф.</i> Моделирование потока газа в рабочем колесе детандера ОРЦ-установки, применяемой в отопительной котельной.....	368
<i>Стенников В.А.</i> Цифровизация и интеграция – перспективные направления развития энергетики	370
<i>Стрижак П.А., Антонов Д.В., Федоренко Р.М.</i> Сравнение характеристик вторичных капель при столкновениях и микро-взрывной фрагментации.....	372
<i>Супельняк М.И.</i> Влияние формы тела на колебания температуры и термоциклические напряжения в термическом слое	374
<i>Сыродой С.В.</i> О выборе кинетической модели гетерогенного окисления частицы водоугольного топлива	376
<i>Темникова Е.Ю., Богомолов А.Р., Косарев Д.М.</i> Топливные брикеты из шламов (кека) обогатительных фабрик	378
<i>Темникова Е.Ю., Богомолов А.Р., Лапин А.А.</i> Фильтрующие и теплоизоляционные элементы из золы уноса теплоэлектростанций	380

Терехов В.И.

Теплообмен в высокотурбулентных потоках энергетических установок.
Состояние проблемы..... 382

**Тимофеев В.А., Смоленцев С.С., Васильев Д.Н., Моисеев А.А., Смирнов П.Г.,
Борейшо А.С., Савин А.В.**

Теплофизические процессы в аддитивных технологиях при выращивании
изделий из жаропрочных материалов: практика и математическое
моделирование 384

Тонконог В.Г., Тукмаков А.Л., Тукмакова Н.А., Акбиров З.Р., Ваньков В.И.

Моделирование термо- и гидродинамических процессов в системах
регазификации сжиженного природного газа 386

Тугов А.Н., Сидоркин В.Т., Берсенева К.Г., Верещетин В.А.

Низкоэмиссионные горелочные устройства для сжигания газообразных
побочных продуктов сланцепереработки, металлургии и нефтехимии 388

Тюрин Э.А., Медников А.С., Елсуков П.Ю., Сушко С.Н.

Переработка биомассы в синтетические жидкие топлива и электроэнергию:
сопоставление перспективных технологий 390

Ушаков К.Ю., Петров И.Я., Богомолов А.Р., Зябрев А.С.

Термолиз углей с получением топливного газа и химических продуктов 392

Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.

Характеристики вторичных капель при микровзрывном дроблении капель
неоднородных жидкостей..... 394

Федотова Е.В.

Парадигма открытого кода для климатических расчетов в энергетике..... 396

Федотова Е.В., Клименко В.В.

Развитие возобновляемой энергетики в России в контексте изменений климата:
возможности и риски 398

Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Баталова А.А.

Физико-химические методы контроля органических примесей в питательных
водах котлов-утилизаторов ТЭС 400

Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Филимонов А.Г.

Технологии мониторинга и очистки возвратного производственного конденсата
в энерготехнологическом комплексе ТЭС-нефтехимическое предприятие..... 402

Филиппов М.В., Чохар И.А., Пахомов М.А. Исследование поведения пристенной газовой завесы, вдуваемой через наклонные круглые отверстия в поперечную траншею	404
Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И. Особенности развития течения в ближней зоне турбулентной кольцевой струи	406
Харламов Г.В. Молекулярная диффузия в газах и жидкостях: расчеты методом молекулярной динамики	408
Хасхачих В.В., Герасимов Г.Я., Корнильева В.Ф. Исследование процесса пиролиза различных видов нефтесодержащих отходов	410
Хвесьюк В.И., Лю Б., Баринов А.А. Моделирование процесса распространения тепла через термоинтерфейсы	412
Хвесьюк В.И., Цяо В., Баринов А.А. Применение прямого Монте-Карло моделирования для решения задачи диффузии фоонов.....	414
Хвесьюк В.И., Янюшкин Ю.М. Преподавание курса «Теплофизика наноструктур».....	416
Чернецкий М.Ю., Бутаков Е.Б., Бурдуков А.П. Влияние предварительной интенсивной механической обработки угля на образования отложений при пылеугольном сжигании	418
Шамирзаев А.С., Кузнецов В.В. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении озонобезопасных хладонов в микроканалах	420
Штым А.Н., Штым К.А., Соловьёва Т.А. Оптимизация конструкции циклонного предтопка мощностью 65 МВт	422
Штым К.А., Гончаренко Ю.Б., Лесных А.В., Васильев П.В. Расчет тепловой схемы паровой турбины с использованием программного продукта BOILER DESIGNER	424
Янюшкин Ю.М. Решение задачи теплообмена процесса плазменной наплавки круглого диска для определения параметров процесса и его управления.....	426

СЕМИНАР ВУЗОВ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

Материалы
Всероссийской научной конференции
с международным участием

21–23 октября 2019 года

Санкт-Петербург

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 09.10.2019. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 28,0. Тираж 252. Заказ 18260b.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного оргкомитетом конференции,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.